

Dichtigkeitsprüfung an Bauwerksbeton

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy
Dipl.-Ing. D. Bunte

Dezember 1989

Mit Hilfe von Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen
wurde diese Arbeit in dankenswerter Weise gefördert.

Erlaß vom 11.06.1986 - GZ: 2095 - BV4e - 9/86

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

INHALTSVERZEICHNIS

1.	DARSTELLUNG DER FORSCHUNGSZIELE	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Zielsetzung des Forschungsvorhabens	5
1.3	Überblick über das Arbeitsprogramm	5
2.	BESTIMMUNG DES FEUCHTEGRADIENTEN AN BETONKÖRPERN	7
2.1	Feuchtemeßverfahren	7
2.2	Untersuchte Baustoffe	9
2.3	Durchführung der Prüfung	10
2.4	Versuchsergebnisse	11
2.4.1	Feuchtebestimmung durch Messung des elektrischen Widerstands	11
2.4.2	Ergebnisse an Platten nach ca. 60 bzw. 120 Trocknungstagen	11
2.4.3	Ergebnisse an Platten nach mehr als 360 Trocknungstagen	13
3.	ABSORPTIONSVERSUCHE AN BETONWÜRFELN MIT KONTROLLIERTEN WASSERGEHALT	14
3.1	Verwendete Versuchstechniken	14
3.1.1	Wassereindringprüfung	14
3.1.2	ISA-Prüfung	15
3.1.3	Covercrete absorption test (CAT)	16
3.2	Untersuchte Baustoffe	18
3.3	Durchführung der Prüfung	18
3.4	Versuchsergebnisse	19
4.	DICHTIGKEITSPRÜFUNGEN AN FREIBEWITTERTEN BETONFLÄCHEN	21
4.1	Aufgabenstellung	21
4.2	Erläuterung der eingesetzten Versuchstechniken	23
4.2.1	Versuche zur CO ₂ -Diffusion	23
4.2.2	Versuche zum kapillaren Wassertransport	25
4.2.2.1	Laborversuche zur kapillaren Wasseraufnahme	25
4.2.2.2	Versuche an Bauteilen	26

4.2.3	Porositätsbestimmung durch Wassersättigung unter Atmosphärendruck und Vakuum	27
4.3	Herstellung der Versuchswände	29
4.3.1	Überblick	29
4.3.2	Zusammensetzung der Versuchswände	30
4.3.3	Herstellung, Frischbetoneigenschaften und Begleitkörper	30
4.3.4	Bewehrungsanordnung	32
4.3.5	Nachbehandlung und Lagerung	32
4.3.6	Bohrkernentnahme	33
4.3.7	Festbetoneigenschaften	33
4.3.7.1	Ergebnisse der nach DIN 1048 gelagerten Begleitkörper	33
4.3.7.2	Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung der Erhärtungs- würfel	34
4.4	Zeitplan der Prüfungen	34
4.5	Festigkeitseigenschaften der Versuchswände	36
4.6	Ergebnisse der Laboruntersuchungen	37
4.6.1	Einleitung	37
4.6.2	Allgemeine Darstellung der Versuchsergebnisse	39
4.6.2.1	Fragestellungen	39
4.6.2.2	V Versuchsergebnisse	41
4.6.3	Dichtigkeits- und Porositätseigenschaften in Abhängig- keit betontechnologischer Parameter	43
4.6.3.1	Einleitung	43
4.6.3.2	Einfluß der Betonzusammensetzung	44
4.6.3.3	Einfluß der Nachbehandlung	50
4.6.3.4	Einfluß des Betonalters und der Entnahmetiefe	52
4.6.4	Gegenseitige Abhängigkeit der untersuchten Betoneigen- schaften	53
4.6.4.1	Porosität und Dichtigkeit	53
4.6.4.1.1	Porosität und Wasseraufnahmekoeffizient	54
4.6.4.1.2	Porosität und Wassereindringkoeffizient	56
4.6.4.1.3	Porosität und CO ₂ -Diffusionskoeffizient	57
4.6.4.2	Wasserkapazität und Porosität	57
4.6.4.3	Diffusion und Kapillarleitung	58
4.6.4.4	Zusammenfassung	58

4.7	Ergebnisse der Bauwerksmessungen	59
4.7.1	Überblick	59
4.7.2	Ergebnisse der Feuchtemessungen	60
4.7.2.1	Ergebnisse der Messungen an den Eichkörpern	60
4.7.2.2	Ergebnisse der Messungen an den Versuchswänden	62
4.7.3	Witterungseinflüsse auf den ISA-Meßwert	63
4.7.3.1	Allgemeine Beschreibung der Einflüsse	63
4.7.3.2	Temperaturabhängigkeit der ISA-Messungen	64
4.7.3.3	Feuchteabhängigkeit der ISA-Messungen	64
4.7.4	Einfluß betontechnologischer Parameter auf den ISA-Wert	64
4.7.4.1	Untersuchte Baustoffe	64
4.7.4.2	Einfluß der Betonzusammensetzung	65
4.7.4.3	Einfluß der Nachbehandlung	65
4.7.4.4	Einfluß des Betonalters	66
4.7.4.5	Einfluß der Dicke der Betondeckung	67
4.7.5	Ergebnisse der Wassereindringprüfung	67
4.7.6	Korrelation der Ergebnisse der ISA-Messungen mit denen der Wassereindringprüfung	68
4.7.7	Vergleich der Ergebnisse der Laborversuche mit denen der Bauteilversuche	69
5.	BEURTEILUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE	72
6.	LITERATUR	75

TABELLEN

ABBILDUNGEN

1. DARSTELLUNG DER FORSCHUNGSZIELE

1.1 Aufgabenstellung

Gegenstand dieses Forschungsvorhabens ist die Bestimmung der Dichtigkeit des Betons des oberflächennahen Bereichs (z.B. Betondeckung) von wandartigen Stahlbetonbauteilen, die ungeschützt der Witterung ausgesetzt sind. Die Dichtigkeit der Betondeckung wird durch die erzielte Qualität und Struktur des Betons, sowie von dessen variablen Feuchtegehalt bestimmt. Zur Bestimmung der Dichtigkeit dienen hier Absorptionsversuche mit begleitenden Feuchtegehaltsmessungen. Nur aus der Kenntnis beider Größen kann eine Quantifizierung der Dauerhaftigkeit vorgenommen werden.

Die Dauerhaftigkeit von witterungsbeanspruchten Stahlbetonbauteilen wird durch die hohe Alkalität der Porenflüssigkeit des Betons bestimmt. Im alkalischen Milieu bildet sich auf der Oberfläche der Bewehrung eine Passivschicht. Der Verlust der Alkalität der Porenflüssigkeit durch Karbonatisierung führt zur Auflösung der Passivschicht und damit zu einem Abbau der Dauerhaftigkeit. Nur wenn die Endkarbonatisierungstiefe kleiner als die Betondeckung bleibt, ist die Dauerhaftigkeit des Bauteils gegeben. Dabei ist die Streuung beider Größen zu beachten.

Die Endkarbonatisierungstiefe kann durch Messung der Karbonatisierungswiderstände abgeschätzt werden. Baustoffspezifische Widerstände sind die chemische Zusammensetzung und die Diffusionsdichtigkeit des Betons. Der konstruktive Widerstand des Bauteils ist durch die Dicke der Betondeckung gegeben /1;2/.

Die Diffusionsdichtigkeit ist durch Messung am Bauwerk nicht direkt ermittelbar. Die heute vorhandenen Meßverfahren bestimmen die Dichtigkeit gegen Gas- bzw. Flüssigkeitsströmung (Permeation) oder kapillaren Wassertransport (Absorption) /3;4/. Ein physikalisch begründeter Zusammenhang zwischen den Ergebnissen dieser Messungen und denen zur Charakterisierung der Diffusionseigenschaften besteht nicht. Nur eine empirisch begründete Korrelation zwischen Absorptionsmessungen am Bauwerk und Diffusionsmessungen im Labor (an aus dem Bauwerk entnommenen Proben), gewährleistet die Eignung von Absorptionsmessungen zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit /5/.

1.2 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Entsprechend der skizzierten Aufgabenstellung werden folgende Ziele verfolgt:

- a) Bestimmung des Einflusses der Feuchtigkeit auf das Absorptionsvermögen freibewitterter Betonoberflächen; Abhängigkeit des Absorptionsvermögens von Parametern wie w/z-Wert, Nachbehandlungsart, Betonalter u.a.
- b) Klärung des Zusammenhangs zwischen den Absorptionskennwerten (aus Bauwerksmessung) und den Diffusionskoeffizienten (aus Laborversuchen) in Abhängigkeit der oben angegebenen Parameter.
- c) Untersuchungen zur Beziehung zwischen Dichtigkeit und Porosität und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit.

Bevor mit diesen Untersuchungen, die an großformatigen, wandartigen Versuchskörpern durchgeführt werden sollen, begonnen werden kann, soll:

- d) ein zerstörungsfreies geeignetes Feuchtemeßverfahren gefunden und dessen Anwendungsmöglichkeiten erprobt werden;
- e) in Laborversuchen an Proben bekannter Feuchte, ein erster Einblick in die zu erwartende Abhängigkeit zwischen Feuchte und Absorptionskennwerten gewonnen werden.

1.3 Überblick über das Arbeitsprogramm

Entsprechend den Forschungszielen wird ein dreiteiliges Arbeitsprogramm konzipiert:

- a) Voruntersuchung I
Das zerstörungsfreie Feuchtemeßverfahren das begleitend zu den Absorptionsmessungen eingesetzt werden soll, besteht in der Messung des elektrischen Widerstands des Betons. Für unterschiedlich feuchte Proben, wird durch

- Messung des elektrischen Widerstands (Aufsetzen eines Meßkopfes auf die Probenoberfläche) und anschließender
- Trocknung der Proben bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz und Feuchtebestimmung

die Beziehung zwischen elektrischen Widerstand und Feuchtegehalt bestimmt. Die dabei gewonnenen Erfahrungen sind Grundlage der weiteren Versuchsplanung (nähere Einzelheiten siehe Abschnitt 2).

b) Voruntersuchung II

An unterschiedlich feuchten Proben (hier: Würfel mit einer Kantenlänge von 15 cm; zwei verschiedene Betonzusammensetzungen) erfolgt die Messung des Absorptionsverhaltens. Dies ergibt eine erste Information über die zu erwartende Größenordnung der Feuchteabhängigkeit von Absorptionsmessungen (näheres siehe Abschnitt 3).

c) Hauptuntersuchung

Absorptionsversuche und Feuchtebestimmungen an freibewitterten Versuchswänden begleitet von Laborversuchen (an Bohrkernabschnitten) zur Bestimmung grundlegender Dichtigkeits- und Porositätskenngrößen wie:

- CO₂-Diffusionskoeffizient
- Wasseraufnahmekoeffizient
- Wassereindringkoeffizient
- Wasserkapazität
- kapillar füllbare Porosität
- Gesamtporosität

(näheres siehe Abschnitt 4)

2. BESTIMMUNG DES FEUCHTEGRADIENTEN AN BETONKÖRPERN

2.1 Feuchtemeßverfahren

Ein Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten der Feuchtemessung kann der einschlägigen Literatur entnommen werden /6-13/.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist ein geeignetes Verfahren zu finden, welches an Versuchswänden anwendbar ist. Vorrangige Anforderungen an ein solches Verfahren sind:

- zerstörungsfreie Ausführung der Messung
- Messungen an ein und derselben Stelle müssen wiederholbar sein
- schnelle und einfache Handhabung des Meßgerätes

Da im Rahmen dieses Vorhabens keine Geräteneuentwicklung vorgesehen ist, kann nur auf bereits bestehende Verfahren zurückgegriffen werden. Deren Anwendungsmöglichkeiten sollen durch die in diesem Abschnitt beschriebenen Vorversuche geklärt werden. Für Messungen an Versuchswänden kommen unter diesen Bedingungen nur zwei Verfahren in Frage.

1. Bestimmung der Feuchte über Messung der rel. Luftfeuchte in Bohrlöchern.
2. Bestimmung der Feuchte über Messung der elektrischen Leitfähigkeit bzw. des Widerstands an einbetonierten Elektroden oder mit Hilfe eines auf die Betonoberfläche aufzusetzenden Meßkopfes.

Von diesen beiden Verfahren wurde das Zweite gewählt. Die Ablehnung der Messung der Betonfeuchte über die rel. Feuchte in Bohrlöchern hatte folgende Gründe:

- a) durch das Bohren eines Loches ist es aufwendiger und zerstörend
- b) zur Umrechnung der gemessenen rel. Luftfeuchte in den Feuchtegehalt des Betons ist die Kenntnis der Sorptionsisotherme des untersuchten Betons erforderlich. Deren Bestimmung ist vergleichsweise aufwendig. Zudem sind Meßwerte von 100 % rel. Luftfeuchte nicht deutbar. Insbesondere bei Bau-

teilen die der Witterung ausgesetzt sind, sind aber zum Teil solche Feuchteverhältnisse zu erwarten.

- c) einmal gebohrte und unmittelbar danach ausgemessene Bohrlöcher stehen für weitere Messungen, die zeitlich später erfolgen, nicht mehr zur Verfügung. Die Langzeitbeobachtung an einer Meßstelle wäre nur dann möglich, wenn außerhalb der Meßzeiten die Bohrlochmantelflächen und die Stirnseite des Bohrlochs wasser- und wasserdampfundurchlässig verschlossen würden. Dies ist jedoch unpraktikabel.

Aber auch die Abschätzung der Betonfeuchte über die Messung des elektrischen Widerstands ist nicht unproblematisch. Die Bedenken gegen dieses Verfahren und die Besonderheiten, denen seine Anwendung unterworfen ist, sind /6-15/, insbesondere /14;15/, zu entnehmen; auf nähere Einzelheiten wird hier nicht eingegangen.

Die Bedenken relativieren sich allerdings vor dem Hintergrund der hier zu bearbeitenden, eng begrenzten Fragestellung. Mit dem angewendeten Verfahren soll keine allgemeingültige Anwendung erzielt werden. Nur der Zusammenhang zwischen dem gemessenen elektrischen Widerstand und der zugehörigen Betonfeuchte, für die Versuchswände an denen Absorptionsmessungen stattfinden, soll geklärt werden. Dies ist möglich, wenn beachtet wird:

- die Geometrie der Elektroden und Elektrodenanordnung immer gleich zu wählen
- zu jeder Versuchswand Eichkörper aus demselben Beton herzustellen. An diesen kann in Trocknungs- und Befeuchtungsversuchen der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und der Feuchte durch Wägung hergestellt werden. Geschieht dies bei verschiedenen Temperaturen, so ist auch die Größe des Temperatureinflusses auf die Meßergebnisse ermittelbar. Die Problematik des Einflusses der Ionenart und -konzentration der Porenlösung auf das Meßergebnis entfällt ebenfalls, da Wand und Eichkörper aus einer gemeinsamen Betonmischung entstammen.
- Polarisierungseffekte durch Messung mit Wechselstrom zu vermeiden. Im Rahmen dieser Voruntersuchung wurde der elektrische Widerstand mit Gleichstrom gemessen, und die Polarisierungseffekte wurden in Kauf genommen. Die

Messung mit Gleichstrom hat den Vorteil, handelsübliche Ohmmeter einsetzen zu können.

- einen immer gleich großen Meßstrom zu verwenden.

Weitere Einzelheiten des Meßvorgangs an sich und zum Umfang der Voruntersuchungen sind Abschnitt 2.3 zu entnehmen.

Diese Vorversuche dienten zur Klärung und Abschätzung:

- des erfaßbaren Meßbereichs
- der Größe der Differenzierung gering voneinander abweichender Feuchtegehalte
- der zu erwartenden Streuung dieses Meßverfahrens.

Insbesondere der erfaßbare Meßbereich ist von Interesse, da ab einem bestimmten Feuchtegehalt keine Zunahme der Ionenkonzentration, und somit Abnahme des Widerstands, bei zunehmender Feuchte, mehr erfolgt /16/.

2.2 Untersuchte Baustoffe

Die Erprobung des Meßverfahrens fand auf Spaltflächen von Wasserplatten statt. Untersucht wurden drei Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichen w/z-Werten und bis zu drei Arten der Nachbehandlung.

Die Betonzusammensetzungen können Tab. 2.2.1 entnommen werden. Die Nachbehandlungsarten mit den Bezeichnungen A, B und C sind in Tab. 2.2.2 näher beschrieben. Aus Tab. 2.2.3 ist die Zuordnung der zu den einzelnen Betonmischungen ausgeführten Nachbehandlungsarten zu ersehen. Es wurden insgesamt sechs Betonagen von je vier Wasserplatten und je neun Würfeln, als Begleikörper zur Druckfestigkeitsbestimmung, betoniert. Die Frischbetoneigenschaften sind Tab. 2.2.4 zu entnehmen. Bis auf die Betonage B1/C handelt es sich um Betone der Konsistenz K2.

Die Festigkeitsentwicklung der Würfel ist in Bild 2.1 wiedergegeben. Die Lagerung der Würfel erfolgte einheitlich für alle Betonagen nach den Bedingungen von DIN 1048. Somit kann an Hand der Druckfestigkeit die Betonqualität der Wasserplatten, durch die Angabe der Festigkeitsklasse nach

DIN 1045, angegeben werden. Es handelt sich bei dem Beton B1/A um einen B 45, bei B1/B um einen B 35, bei B1/C um einen B 35, bei B2/A und B2/C um einen B 15 und bei B3/C um einen B 10.

Von den Werten der Druckfestigkeit her gesehen, wird von diesen Probekörpern ein breites Spektrum abgedeckt.

Nach Ende der jeweiligen Nachbehandlung wurden die Wasserplatten auf 5 Seiten mit einem zweimaligen Epoxidharzanstrich versiegelt. Sie lagerten ab dem Zeitpunkt der Versiegelung bis unmittelbar vor Beginn der Prüfung im Labor bei 20/65 (eindimensionale Trocknung).

2.3 Durchführung der Prüfung

Zu den in Tab. 2.2.5 angegebenen Zeitpunkten wurden die Wasserplatten in einer Druckprüfmaschine in Analogie zur Spaltzugprüfung in 10 ungefähr 2 cm dicke Scheiben aufgespalten (siehe Bild 2.2). Die Lasteinleitung erfolgte dabei über 2 Stahldrahtabschnitte von ca. 25 cm Länge und einem Durchmesser von ca. 4 mm. Unmittelbar nach dem Spalten wurden die Scheiben gewogen. Auf beiden Spaltflächen (in der Darstellung von Bild 2.2 ist dies die y-z Ebene der Wasserplatten) erfolgte die Messung des elektrischen Widerstands. Pro Spaltfläche wurden 5 - 6 Messungen durchgeführt. Nur deren Mittelwert ist in den Darstellungen der Versuchsergebnisse aufgetragen.

Anschließend werden die Scheiben bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C getrocknet.

Die Prüfungen der Wasserplatten der Betonage B1 erfolgten vor der Betonage der Versuchswände und sollten die grundsätzliche Eignung von Feuchtemessungen durch Bestimmung des elektrischen Widerstands nachweisen und als Entscheidungshilfe bei der Auswahl eines geeigneten Verfahrens dienen.

2.4 Versuchsergebnisse

2.4.1 Feuchtebestimmung durch Messung des elektrischen Widerstands

Der elektrische Widerstand wurde über den in Bild 2.3 dargestellten Meßkopf bestimmt. Dieser wurde mit einem handelsüblichen Ohmmeter verbunden. Durch Aufsetzen der beiden Madenschrauben auf den feuchten Beton der Spaltflächen wurde der Stromkreis geschlossen. Beim Aufsetzen des Meßkopfes wurde darauf geachtet, jeweils Mörtelbereiche zu treffen. Dabei ist der Aufsetzdruck so groß zu wählen, daß keine Druckabhängigkeit des Widerstands mehr gegeben ist und daß der Übergangswiderstand zwischen den Elektroden und dem Meßgut gegenüber dem Probenwiderstand vernachlässigbar ist. Für den letzteren Fall ist dies bei einem Mindestdruck von $0,2 \text{ N/mm}^2$ gewährleistet /6/.

2.4.2 Ergebnisse an Platten nach ca. 60 bzw. 120 Trocknungstagen

Die Ergebnisse für die Wasserplatten der Betonage B1/A - B1/C sind in den Bildern 2.4 bis 2.6 in Form von Feuchteprofilen dargestellt. Es werden jeweils die Ergebnisse der gemessenen Widerstände, den durch Trocknung ermittelten Feuchtegehalten gegenübergestellt. Für diese Vorversuche erfolgte die Messung mittels Gleichstrom.

Die Feuchtebestimmung durch Trocknung der Spaltkörper bei 105°C zeigt, daß sich nur für die Nachbehandlungsart A ein deutliches Feuchtegefälle einstellt. Für die Nachbehandlungsarten B und C ist der Feuchteverlauf annähernd konstant. Die Messungen des Widerstands spiegeln diese Ergebnisse nur zum Teil wieder. Im Randbereich bis ca. 4 cm Tiefe, wird eine deutliche Abnahme des Widerstands mit wachsender Entfernung von der Trocknungsoberfläche gemessen. Für den übrigen Bereich ist auch hier der Meßwert annähernd konstant. Dabei ist allerdings zu beachten, daß die Widerstände erst nach Abschluß der Polarisierungseffekte gemessen wurden. Alle Messungen fanden bei 20°C statt. Bild 2.7 gibt den Zusammenhang zwischen den gemessenen elektrischen Widerständen und den durch Trocknung ermittelten Feuchtegehalten wieder. Es zeichnet sich eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Logarithmus des Widerstands und dem Feuchtegehalt ab. Diese gilt für den ge-

samen hier vorliegenden Feuchtebereich von 6,5 - 10 Vol.-%. Die Streuung ist groß. Quantifizierungen sind nur eingeschränkt möglich.

Die Meßwerte liegen im oberen mit dem benutzten Gerät möglichen Anzeigebereich von 50 M Ω .

Da das Feuchtegefälle nur sehr gering ausgeprägt war, wurden die Prüfungen der übrigen Platten auf einen Zeitraum deutlich längerer Austrocknungsdauer (mehr als 1 Jahr) verschoben.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, daß für definierte Anwendungsbedingungen (siehe Abschnitt 2.1) eine grundsätzliche Abhängigkeit zwischen Feuchte und elektrischen Widerstand besteht. Die beobachtete Streuung ist groß. Dies ist durch die mitgemessenen Polarisierungseffekte z. T. erklärbar (vgl. die Streuung der Meßergebnisse von Abschnitt 2.4.3). Das Meßverfahren scheint geeignet.

Dagegen ist der verwendete Meßkopf nicht für Messungen am Bauwerk einsetzbar. Für geringere Feuchtegehalte als 6 Vol.-% ist der Widerstand zu groß, um von handelsüblichen Meßgeräten angezeigt werden zu können. Da eine Verringerung des Elektrodenabstands von 1 cm ebensowenig wünschenswert ist, wie eine Vergrößerung der Elektrodenflächen (Gefahr eines nicht vollflächigen Aufsetzens der Elektroden), sind die Grenzen dieser Meßanordnung erreicht. Darüberhinaus ist bei Messungen auf einer geschalteten Oberfläche nicht erkennbar, ob die Messung direkt über einem Zuschlagkorn oder über Mörtelbereichen stattfindet. Diese Unsicherheit verbunden mit den Tatsachen, daß das Meßergebnis vom Aufsatzdruck abhängig ist (sofern ein bestimmter Mindestdruck nicht überschritten wird) und die Kontaktfläche Beton-Elektrode von der Schiefstellung des Meßkopfes abhängt, führt dazu, daß das Meßergebnis von der Sorgfalt der Person abhängt, die die Messung durchführt.

Bei den Versuchswänden wird deshalb eine Meßanordnung mit einbetonierten Elektroden verwendet werden.

2.4.3 Ergebnisse von Platten mit mehr als 360 Trocknungstagen

In den Bildern 2.8 - 2.11 sind die Feuchte- und Widerstandsprofile der Probekörper mit den Betonzusammensetzungen B1/C, B2/A, B2/C und B3/C wiedergegeben. Die Verlängerung der Trocknungsdauer führt zu deutlich ausgeprägteren Feuchteprofilen. Diese sind sowohl über die Trocknung der Scheiben als auch durch Messung des elektrischen Widerstands feststellbar.

Bild 2.12 zeigt den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und der Betonfeuchte für Feuchtegehalte zwischen 4 und 12 Vol.-%. Die Ablesung erfolgte vor dem Auftreten von Polarisierungseffekten. Die Streuung fällt wesentlich geringer aus, als bei Messungen nach Abklingen der Polarisierungseffekte. Auch hier ist eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Logarithmus des Widerstands und der Feuchte erkennbar. Der erfaßte Meßbereich beinhaltet nahezu alle praktisch auftretenden Feuchtegehalte.

3. ABSORPTIONSVERSUCHE AN BETONWÜRFELN MIT KONTROLLIERTEN WASSERGEHALT

3.1 Verwendete Versuchstechniken

Absorptionsversuche wurden mit

den folgenden drei Methoden durchgeführt:

- a) Wassereindringprüfung analog dem Verfahren von Karstens /17/
- b) Initial surface absorption test (ISAT) nach BS 1881, pt 5 /18/
- c) Covercrete absorption test (CAT) /19/

Diese Versuchstechniken sind sowohl im Labor als auch an Bauteilen anwendbar. Alle drei Verfahren beurteilen die infolge Kapillarität aufgenommene Wassermenge.

3.1.1 Wassereindringprüfung

Ausgangspunkt der Messung ist die wasserdichte Befestigung einer Meßkappe (\varnothing 80 mm) auf der Betonoberfläche. Die Meßkappe ist mit einem kalibrierten Glasrohr mit Volumeneinteilung verbunden (Bild 3.1). Die Versuchseinrichtung wird bis zur Nullmarke bzw. einer frei gewählten Anfangsmarke mit Wasser gefüllt. Zu verschiedenen Zeiten t_i nach Versuchsbeginn wird die eingedrungene Wassermenge ΔV_i in cm^3 festgestellt. Die anfängliche Füllung erfolgt so, daß eine Wassersäule von weniger als 10 cm Höhe entsteht. Bei sehr saugfähigen Betonen ist durch Auffüllen auf die Höhe der Anfangsmarke dieser Überdruck konstant zu halten. Geringe Schwankungen sind vernachlässigbar.

Als Abdichtungsmaterial zwischen Kappe und Wandoberfläche wird Kitt gewählt. Die Prüffläche sollte durch das Aufkitten nicht wesentlich verringert werden. Ist dies nicht der Fall, so ist die Kappe zu entfernen und mit verringerter Kittmenge erneut anzubringen. Als Prüf Flüssigkeit ist destilliertes bzw. deionisiertes Wasser zu verwenden. Bei der Prüfung sind die Wasser- und Lufttemperatur festzustellen.

Das Versuchsergebnis ist die bis zum Beobachtungszeitpunkt von der Betonoberfläche absorbierte Wassermenge $\Delta g_i = \Delta V_i \cdot \rho_w$. Die weitere Auswertung erfordert eine Annahme über die Form des Bereiches von dem das Wasser aufgenommen wird. (Es handelt sich um den instationären, dreidimensionalen Anfangszustand der Wasseraufnahme.) Die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten A_{wt} ist dann der Quotient aus

$$A_{wt} = \frac{\Delta V_i \cdot \rho_w}{\sqrt{t_i} \cdot F(t)} \quad (3.1)$$

wobei $F(t)$ die zur Zeit t vom Kappilartransport benötigte Fläche ist, die Fläche auf die sich das Wasser verteilt (für $t > 0$, ist $F(t) > F_{\text{Kappe}}$). Für $t = 10 \text{ min}$ kann in guter Näherung $F(t) = F_{\text{Kappe}}$ gesetzt werden, so daß gilt:

$$A_{w10} = \frac{\Delta V_{10} \cdot \rho_w}{\sqrt{10/60} \cdot F_{\text{Kappe}}} = 0,487 \cdot \Delta V_{10} \quad (3.1a)$$

3.1.2 ISA-Prüfung

Auch für die ISA-Prüfung wird die von der Wassereindringprüfung her bekannte Prüfkappe $\varnothing 80 \text{ mm}$ verwendet. Analog zu dem dortigen Vorgehen wird sie wasserdicht auf der Betonoberfläche befestigt. Sie ist mit einem Wasserreservoir und einer skalierten Glaskapillare zu verbinden (siehe Bild 3.2). Zwischen dem Reservoir und der Kappe befindet sich ein Ventil. Der Beginn des Versuchs ist die Wasserfüllung der Kappe über das angeschlossene Reservoir. Das Ventil ist dabei geöffnet. Der Wasserspiegel des Reservoirs befindet sich ca. 20 cm über der Kappenmitte und liegt mit der horizontal ausgerichteten Kapillare auf einer Höhe.

Zu bestimmten Zeiten nach Versuchsbeginn (10, 20, 30, 60 und 120 Minuten) erfolgt die Ablesung des ISA-Wertes. Dazu wird unmittelbar vor diesen Zeitpunkten mittels des Ventils die Wasserzufuhr zwischen Kappe und Reservoir unterbrochen. Die weitere Wasseraufnahme durch die Betonoberfläche unterhalb der Meßkappe führt zu einer Veränderung des Wasserstandes in der Kapillare. Die Veränderung während des Zeitraums von einer Minute, abgelesen

in Skalenteilen der Kapillare, ist der ISA-Wert. Die Skalierung wurde durch einen Eichvorgang so festgelegt, daß der Abstand zwischen zwei Skalenteilen einen ISA-Wert von $0,01 \text{ ml}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ entspricht. Weitere Einzelheiten sind /18/ zu entnehmen.

Auch hier ist nur für die Ablesung nach 10 Minuten (ISA_{10}) die Eindringzeit gering genug, um näherungsweise von einem eindimensionalen Transportgeschehen ausgehen zu können. Für einen eindimensionalen Transport ergibt sich eine Proportionalität zwischen der Wasseraufnahmemenge Δg und der Wurzel der dazu benötigten Zeit t , wobei der Wasseraufnahmekoeffizient A der Proportionalitätsfaktor ist /20/:

$$\Delta g = A \cdot \sqrt{t} \quad (3.2)$$

Die mit Hilfe des ISA-Verfahrens bestimmte Wassereindringmenge pro Zeit stellt die Wassereindringgeschwindigkeit dar, und kann als Ableitung von (3.2) berechnet werden:

$$\text{ISA}_t = \frac{d \Delta g}{dt \cdot \rho_w} = \frac{1}{2 \cdot \rho_w} \cdot A \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (3.3)$$

und für $t = 10 \text{ min.}$

$$\text{ISA}_{10} [\text{m}^2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] = 0,34 \cdot A [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})] \quad (3.4)$$

Zwischen den ISA-Verfahren und der Wassereindringprüfung besteht somit ein physikalischer Zusammenhang.

3.1.3 Covercrete absorption test (CAT)

Der covercrete absorption test ist die Variante des ISA-Versuchs, bei der die Meßtechnik dahingehend geändert wird, daß die Wassereindringung über der Dicke der Betondeckung erfolgt. Die Gründe die für eine Variation der ISA-Meßanordnung sprechen, sind:

- vom ISA-Test werden nur die vordersten Millimeter der Betondeckung durch die Wasserfront beaufschlagt (genaue Tiefe abhängig von der Betonqualität). Für die Dauerhaftigkeit ist aber u.U. die ganze Dicke der Betondeckung maßgebend.

- beim Vorhandensein von Anstrichen oder Oberflächenverunreinigungen kann die Absorption be- bzw. verhindert sein.
- der ISA-Test betrifft insbesondere die bereits karbonatisierte Randschicht, aber nicht den "ursprünglich, unbeanspruchten" Beton (bei PZ-Betonen nimmt die Dichtigkeit infolge Karbonatisierung zu).

Eine Skizze des Versuchsaufbaus ist Bild 3.3 zu entnehmen. Über einem Bohrloch von ca. 13 mm Durchmesser und bis zu 50 mm Tiefe wird eine Prüfkappe zentrisch angebracht. Diese besteht aus einem durchsichtigen Kunststoffblock mit 2 Bohrungen die am unteren Ende zusammenlaufen. Eine der beiden Bohrungen wird wieder mit einem Wasserreservoir verbunden, dessen Wasserspiegel ca. 20 cm über der mittleren Höhe des Bohrloches liegt. An die andere Bohrung wird eine skalierte Glaskapillare angeschlossen. Zwischen Reservoir und Kappe befindet sich auch hier ein Ventil. Die Kapillare liegt auf einer Höhe mit dem Wasserspiegel des Reservoirs.

Das weitere Vorgehen ist dem des ISA-Verfahrens analog. Über das Reservoir wird zunächst das Bohrloch und anschließend die Kapillare mit Wasser gefüllt. 10 Minuten nach Herstellung des Wasserkontakts wird auch hier, nachdem zuvor das Ventil geschlossen wurde, die Absorption der Betonoberfläche mittels der Veränderung des Wasserstands in der Kapillare während des Zeitraumes von einer Minute beobachtet.

Neben den zuvor erwähnten Vorteilen dieses Verfahrens gegenüber einer ISA-Messung, ist seine Anwendung mit folgenden Nachteilen verbunden:

- Beeinträchtigung der Betonoberfläche durch Bohren eines Lochs von mindestens 13 mm Durchmesser.
- Je nach Bohrlochdurchmesser und -tiefe findet ein nennenswerter Teil des Absorptionsvorgangs durch die Stirnseite des Bohrlochs statt.
- Durch das Bohren entstehen unter Umständen im Mantelbereich des Bohrlochs Mikrorisse, die das Ergebnis verfälschen. (Insbesondere bei jungen Betonen kann dies nicht ausgeschlossen werden.)

- Gegenüber dem ISA-Verfahren mit einer Prüffläche von ca. 50 cm² verringert sich diese hier je nach vorliegenden Verhältnissen bis auf ca. 10 cm². Der Vorteil des ISA-Verfahrens eine für den Beton als repräsentativ anzusehende Prüffläche zu beurteilen, entfällt hier.
- Die Prüfrichtung verläuft parallel zur Oberfläche, während das Eindringen von Gasen und Flüssigkeiten senkrecht zur Oberfläche erfolgt.

Auf Messungen mit diesem Verfahren an den Versuchswänden wird deshalb verzichtet.

3.2 Untersuchte Baustoffe

Zur Ermittlung der Feuchteabhängigkeit der Ergebnisse der zuvor beschriebenen Absorptionsmeßmethoden werden in 2 Betonagen je 4 Würfel mit $a = 15$ cm Kantenlänge betoniert. An Begleitkörpern wird im Alter von 7, 28 und 90 Tagen an je 3 Würfeln die Druckfestigkeit ermittelt.

Tab. 3.2.1 enthält die erforderlichen Angaben zur Betonzusammensetzung. Diese Betonzusammensetzungen werden auch für die Versuchswände verwendet werden. Die Frischbetoneigenschaften sind Tab. 3.2.2 zu entnehmen.

Die Würfel wurden nach einem Tag ausgeschalt und lagerten 56 Tage in Folie versiegelt. Anschließend wurden sie nach Entfernen der Folie in geschlossene Behälter bei verschiedenen rel. Feuchten gelagert. Die Einlagerungsdauer betrug mindestens 1 Jahr. Dabei sollten und wurden keine Gleichgewichtsfeuchten erzielt. Ziel war nur die Erzeugung unterschiedlicher Feuchtegehalte.

Die Festigkeitsentwicklung der nach DIN 1048 gelagerten Würfel ist Bild 3.4 zu entnehmen. Bei dem Beton der Betonage B4 handelt es sich um einen B 45, bei dem der Betonage B5 um einen B 25.

3.3 Durchführung der Prüfung

Zur Erzeugung unterschiedlicher Feuchtegehalte lagerte je ein Würfel jeder Betonage bei einer von vier bzw. fünf verschiedenen Feuchten. Geprüft wurden von jedem der Würfel

- 2 Seitenflächen mittels der Wassereindringprüfung
- 2 Seitenflächen mittels der ISA-Prüfung
- die Oberseite mittels des CA-Tests (Bohrloch Ø 14 mm - 16 mm, Tiefe ca. 50 mm)

Die Unterseite der Würfel wurde in einer Stärke von ca. 20 mm unmittelbar nach Versuchsende abgespalten. Durch eine Ofentrocknung bei 105 °C konnte ihr Feuchtegehalt bestimmt werden.

3.4 Versuchsergebnisse

In den Bildern 3.5 - 3.7 sind die Versuchsergebnisse getrennt für die drei Absorptionsverfahren dargestellt. Wie erwartet steigt mit zunehmenden Feuchtegehalt die Dichtigkeit an. Für die Feuchteabhängigkeit lassen sich 3 Bereiche voneinander abgrenzen (angegebene Feuchtegrenzwerte sind nur Schätzwerte):

a) Feuchtegehalte kleiner als ca. 1,5 Gew.-%

In diesem Feuchtebereich ist die Dichtigkeit unabhängig vom Feuchtegehalt. Es wird die Dichtigkeit der "reinen" Betonqualität gemessen. Da entsprechend trockene Betone hier nicht untersucht wurden, da derartige Feuchteverhältnisse bei witterungsbeanspruchten Betonen nicht vorkommen, stützt sich diese Aussage auf in der Literatur veröffentlichte Ergebnisse /19 - 23/.

b) Feuchtegehalte größer als ca. 4,0 Gew.-%

Die ermittelbare Dichtigkeit ist unabhängig von der erzielten Betonqualität. Ein derart feuchter Beton ist praktisch undurchlässig.

c) Feuchtegehalte zwischen ca. 1,5 und 4,0 Gew.-%

Die Dichtigkeit wird maßgeblich vom Feuchtegehalt beeinflusst. Eine Steigerung des Feuchtegehalts von 1,5 Gew.-% auf 4,0 Gew.-%, bewirkt eine Verringerung der Durchlässigkeit um den Faktor 10 und mehr.

Außerdem zeigt sich, daß Dichtigkeitsunterschiede zwischen Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung bzw. Qualität, nur bis zu einem von der Betonzusammensetzung abhängigen Feuchtegehalt nachweisbar sind. So unterscheiden sich die beiden hier untersuchten Betone mit einem w/z-Wert von 0,5 und 0,85, in ihrer Dichtigkeit nur für Feuchtegehalte die kleiner als ca. 3,0 - 3,5 Gew.-% sind.

Somit ist jeder Beton ein dichter Beton bzw. ein dauerhafter Beton, wenn er nur genügend feucht ist. Ob ein Beton bestimmter Zusammensetzung und Qualität sich im Rahmen einer konkreten Bauaufgabe als dauerhaft erweist, hängt ganz vom Grad seines, durch die Witterungsbeanspruchung bestimmten, Feuchtegehalts ab. Damit ist natürlich nur derjenige Dauerhaftigkeitsaspekt gemeint, der im Abschnitt 1 beschrieben wurde. Fragen der Frostbeständigkeit bleiben hier unberücksichtigt.

4. DICHTIGKEITSPRÜFUNGEN AN FREIBEWITTERTEN BETONFLÄCHEN

4.1 Aufgabenstellung

Den Schwerpunkt der Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens bilden Dichtigkeits- und Porositätsmessungen an praxisnah hergestellten und frei bewitterten Versuchswänden. Hierzu werden sowohl zerstörungsfreie Absorptionsmessungen direkt auf der im Regelfall nicht weiter vorzubereitenden Bauteiloberfläche, als auch Laboruntersuchungen an aus diesen Wänden entnommenen Bohrkernen bzw. Bohrkernabschnitten, vorgenommen.

Die Betone der Versuchswände wurden hinsichtlich ihrer Zusammensetzung (4 verschiedene Betone mit unterschiedlichem w/z-Wert und Zementgehalt) und ihrer Nachbehandlung (zu jedem Beton 2 Nachbehandlungsarten) variiert. Die beiden Nachbehandlungsarten waren:

- a) keine weitere Nachbehandlung nach dem Ausschalen nach einem Tag und
- b) 7 Tage Nachbehandlung mittels feuchten Tüchern und Folienabdeckung nach dem Ausschalen (ebenfalls nach einem Tag).

Sie stellen Grenzfälle üblicher Baupraxis dar. Auf eine nähere Untersuchung feinerer Zwischenstufen wird verzichtet, da

- a) zu erwarten ist, daß sie auf Betonqualitäten führen, die innerhalb der durch diese Variation erfaßten Grenzen liegen und
- b) sich dieses Forschungsvorhaben vordergründig nicht mit Fragestellungen zur Wirksamkeit von Nachbehandlungsmethoden beschäftigt.

Die Dichtigkeit des Betons soll mittels Absorptionsmessungen beurteilt werden. Dazu werden die im vorigen Abschnitt bereits benutzten Versuchstechniken:

- a) Wassereindringprüfung und
- b) ISA-Test

eingesetzt.

Im Mittelpunkt des Interesses stehen Fragen nach

- a) der Abhängigkeit der Prüfergebnisse von der Betonzusammensetzung, der Nachbehandlung, dem Betonalter und der Betonfeuchte
- b) der Beziehung der Kenngrößen des Absorptionsverhaltens zu den in Laborversuchen bestimmten Dichtigkeits- und Porositätseigenschaften.

Die in Laborversuchen durchgeführten Prüfungen dienen:

- a) der Bestimmung des CO_2 -Diffusionskoeffizienten
- b) der Bestimmung der Kennwerte des kapillaren Wassertransports (Wasseraufnahmekoeffizient, Wassereindringkoeffizient, Wasserkapazität)
- c) der Bestimmung der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und unter Vakuum zur Ermittlung von Kennwerten der Porosität.

Laborversuche wurden an Bohrkernen und daraus gewonnenen Proben durchgeführt, die zu den Betonaltern 28, 90, 180 und 360 Tagen den Wänden entnommen wurden. Die Absorptionsmessungen wurden in zufälligen Abständen ebenfalls bis zu einem Betonalter von ca. 400 Tagen durchgeführt.

Die Erfahrungen der Vorversuche (siehe Abschnitt 2 und 3) fließen in die Planung dieser Untersuchungen ein. Abschnitt 2 erbrachte den Nachweis, daß die Feuchtebestimmung durch Messung des elektrischen Widerstands über einbetonierte Elektroden möglich ist. Zur Aufnahme von Feuchteprofilen werden Elektrodenpaare in verschiedenen Wandtiefen einbetoniert.

Im Abschnitt 3 wurde an unterschiedlich feuchten Betonwürfeln die Feuchteabhängigkeit des Absorptionsverhaltens festgestellt. Diese ergab sich insbesondere für Feuchtegehalte von 2 bis 4 M.-%. Wie Sorptionsisothermen von Beton zeigen /24/, entspricht dies einer Gleichgewichtsfeuchte zu ca. 40 - 95 % rel. Luftfeuchte. Da dies dem überwiegenden Teil der Luftfeuchteverhältnisse des mitteleuropäischen Klimas entspricht, ist der Feuchteeinfluß auf das Absorptionsverhalten nicht vernachlässigbar.

4.2 Erläuterung der eingesetzten Versuchstechniken

4.2.1 Versuche zur CO₂-Diffusion

Meßprinzip: In einer Betonprobe (runde Scheiben: Ø = 100 mm; d = 10 mm) stellt sich ein CO₂-Diffusionsstrom ein, wenn dessen Oberflächen einem CO₂-Partialdruckgefälle ausgesetzt werden.

Meßgröße: Feststellung der Gewichtszunahme des "Versuchskörpers", bestehend aus einem Alu-Schälchen, dessen oberer Abschluß die Betonprobe darstellt und in der sich Natronkalk als CO₂-Absorbat befindet, zu verschiedenen Zeiten nach aufbringen des Partialdruckgefälles.

Meßgerät: Die wesentlichen Elemente der Prüfeinrichtung sind Bild 4.2.1 zu entnehmen. Im einzelnen sind dies:

- Truhe, in der eine CO₂ angereicherte Atmosphäre erzeugt werden kann (einschließlich Überdruckventil und Lüfter zur CO₂-Verwirbelung),
- CO₂-Gasflaschen mit Ventilen zur kontrollierten Füllung der Truhe,
- x-y-Schreiber zur Ausgabe der CO₂-Konzentration in der Truhe (Kontrolle der Versuchsbedingungen)
- Waage.

Prüfbedingungen: Nachdem CO₂-Absorbat (ca. 20 - 25 g) in die Alu-Schälchen eingebracht worden ist, werden die Proben diffusionsdicht aufgesetzt. Die Seitenflächen der Proben werden ebenfalls abgedichtet (eindimensionaler Transport). Die Diffusionsdichtigkeit dieser Maßnahme wurde überprüft.

Die Proben werden dann in die CO₂-angereicherte Atmosphäre der Prüftruhe eingebracht (Beginn des Diffusionsvorgangs). Zur Wiegung der Proben muß der Diffusionsvorgang jeweils unterbrochen werden (kurzzeitige Öffnung der Truhe und Entnahme der Proben). Diese Unterbrechung übt jedoch keinen nachweisbaren Einfluß auf das Versuchsergebnis aus. Die Wägung der Proben erfolgte in der Regel einmal pro Arbeitstag.

Zur Vermeidung der Karbonatisierung während des Versuchs (Verfälschung des Versuchsergebnisses durch chemisch gebundenes CO₂), erfolgt die Prüfung an getrockneten Proben in getrockneter Atmosphäre. Damit wird auch die Beeinflussung des Versuchsergebnisses durch die ansonsten gleichzeitig stattfindende WD-Diffusion ausgeschlossen.

Auswertung: Nachdem sich ein stationärer Diffusionsstrom eingestellt hat, kann die Gewichtszunahme mit dem 1. Fick'schen Gesetz ausgedrückt werden:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = - D_{\text{CO}_2} \cdot F \cdot \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (4.1)$$

Hieraus ergibt sich der CO₂-Diffusionskoeffizient zu:

$$D_{\text{CO}_2} = \frac{\Delta m \cdot \Delta x}{\Delta t \cdot F \cdot \Delta c} \quad [\text{m}^2/\text{h}] \quad (4.2)$$

mit:

Δm : Gewichtszunahme der Probe [kg]

Δx : Probendicke [m]

Δt : Zeitspanne für die die Gewichtszunahme festgestellt wurde [h]

F : Prüffläche [m²]

Δc : CO₂-Konzentrationsdifferenz [kg/m³ Luft]

Auf weitere mit Hilfe des Diffusionskoeffizienten berechenbare Kennwerte des Diffusionsverhaltens wird hier nicht eingegangen /25/.

Anwendungsgrenzen: Das 1. Fick'sche Gesetz gilt für reine Gasdiffusion. Betonporen haben aber größtenteils Abmessungen, die eine Diffusion im Übergangsgebiet Gas-Knudsen-Diffusion erwarten lassen /26/. Eine Gesetzmäßigkeit, die die Diffusionsvorgänge in diesem Übergangsgebiet exakt beschreibt, ist nicht bekannt. Deshalb erfolgt die Versuchsauswertung trotzdem nach dem 1. Fick'schen Gesetz, auch wenn dies nur näherungsweise gilt. Ebenso liefert die Untersuchung an getrockneten Proben nicht jenen Wert der Dichtigkeit gegenüber CO₂-Diffusion, der für die Dauerhaftigkeit des der Witterung ausgesetzten Bauteils relevant ist. (vergleiche Abschnitt 3.4)

4.2.2 Versuche zum kapillaren Wassertransport

4.2.2.1 Laborversuche zur kapillaren Wasseraufnahme

Meßprinzip: Beaufschlagung der Probenoberfläche mit Wasser und Messung der Wasseraufnahme infolge Kapillarität.

Meßgröße: Die zu bestimmten Saugzeiten nach Versuchsbeginn durch Wägung festgestellte Gewichtszunahme.

Meßgerät: Grundsätzliche Regelungen zur Versuchsdurchführung sind DIN 52 617 zu entnehmen. Im Gegensatz zu dieser Vorschrift erfolgt hier (siehe Bild 4.2.2) eine automatische Gewichtsregistrierung über Wägezellen (Typ Z8 bzw. Z11 der Fa. Hottinger-Baldwin-Meßtechnik) und eine Vielstellenumschaltanlage (UPH 3200) zur Meßwertregistrierung und -ausgabe. Dieser Versuchsaufbau besitzt den Vorteil der kontinuierlichen Wägung (keine Unterbrechung des Saugvorgangs bei Wägung der Proben).

Prüfbedingungen: Die Seitenflächen der Proben wurden nach Trocknung im Vakuum mit Paraffin ummantelt. Hierdurch wird der eindimensionale Wassertransport erzwungen. Verdunstungsverluste durch die Probenseitenflächen treten nicht ein. Die Proben tauchten ca. 2 mm tief in destilliertes Wasser ein. Der Beginn des Saugvorgangs ist der Zeitpunkt des Wasserkontakts.

Zur Vermeidung der Verdunstung von Wasser aus dem Reservoir, erhielt der Wasserbehälter eine Abdeckung (bis auf eine kleine Öffnung für die Durchführung der Probenaufhängung). Wasserspiegelschwankungen (Veränderungen des Auftriebs) infolge von Verdunstung oder durch die aufgesaugte Wassermenge konnten so gering gehalten werden, daß ihr Einfluß auf das Versuchsergebnis vernachlässigbar war. Alle Prüfungen erfolgten bei 18 bis 20 °C und ca. 70 % rel. Feuchte. Die Einhaltung dieser Bedingungen ist erforderlich, weil der Transportvorgang temperaturabhängig ist.

Die Prüffläche wurde so gewählt, daß die Beaufschlagung des realen Bauteils simuliert wurde. Der Wassertransport erfolgte auch für die Proben von der exponierten Wandoberfläche zum Betoninnern, indem die Proben mit der Seite,

die der ehemaligen Wandoberfläche entsprach, in das Wasserbad eintauchten.

Auswertung: Die Auftragung der auf die Probengrundfläche bezogenen Gewichtszunahme (Wasseraufnahme) über der Wurzel der dazu benötigten Zeit, ergibt für quasi-homogene und quasi-isotrope Baustoffe das in Bild 4.2.3 dargestellte, prinzipielle Ergebnis. Es zeichnen sich zwei Geraden ab. Ihr Schnittpunkt gibt die Wasseraufnahmemenge zum Zeitpunkt der Probendurchfeuchtung an. Ausgewertet wird nur die erste der beiden Geraden einschließlich des Schnittpunktes (Zustand bis zu dem die Saugfront die Probenoberseite gerade erreicht hat, in Bild 4.2.3 als Zustand I bezeichnet). Folgende Größen werden bestimmt:

- a) Steigung der Gerade in Zustand I
Der Proportionalitätsfaktor zwischen Gewichtszunahme und der Wurzel der Zeit ist der Wasseraufnahmekoeffizient A:

$$A = g_w / \sqrt{t_s} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}] \quad (4.3)$$

- b) Zeitpunkt t_{sf} des Schnittpunktes
In dem Zeitraum t_{sf} legt die "Saugfront" den Weg der Probenhöhe d zurück. Dies wird durch den Wassereindringkoeffizienten B ausgedrückt:

$$B = d / \sqrt{t_{sf}} \quad [\text{m}/\sqrt{\text{h}}] \quad (4.4)$$

- c) Wasseraufnahmemenge g_f des Schnittpunktes
Die Wasserkapazität ψ ist das Verhältnis von aufgenommenen Wasservolumen zu Probenvolumen im Zustand der kapillaren Durchfeuchtung:

$$\psi = \frac{g_f}{\rho_w \cdot F \cdot d} \cdot 100 \quad [\text{Vol.-%}] \quad (4.5)$$

4.2.2.2 Versuche an Bauteilen

Hierzu werden die bereits in den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 beschriebenen Versuchstechniken Wassereindringprüfung und initial surface absorption test (ISAT) eingesetzt. Einzelheiten zur Versuchsdurchführung siehe dort.

4.2.3 Porositätsbestimmung durch Wassersättigung unter Atmosphärendruck und Vakuum /27/

Meßprinzip: Durch Wasserlagerung einer Betonprobe Feststellung der Wasseraufnahme bei Sättigung der Proben unter Atmosphärendruck und bei Sättigung im Vakuum.

Meßgröße: Aus dem Wassergehalt der Proben in den beiden Sättigungszuständen können die Gesamtporosität, die unter Atmosphärendruck durch Kapillarleitung füllbare Porosität, sowie die Trockenrohdichte und die Reindichte des untersuchten Betons bestimmt werden.

Meßgeräte: An Geräten werden benötigt

- Waage (Ablesegenauigkeit: 1/100 g)
- Vakuumpumpe
- Exsikkatoren (mit einer Einrichtung zum Fluten des Exsikkators unter Vakuum)
- Trockenschrank

Meßvorgang: Die Proben (hier Bohrkernabschnitte) werden nach dem Wiegen (im Folgenden als Probengewicht zu Versuchsbeginn M_A bezeichnet) zunächst 24 Stunden halb eingetaucht in ein Wasserbad gestellt. Anschließend erfolgt eine mindestens 6 tägige Wassersättigung unter Atmosphärendruck durch vollständiges Eintauchen der Proben in ein Wasserbad. Das sich daraus ergebende Probengewicht ist durch Wiegen der Probe unter und über Wasser festzustellen ($M_{\text{(über Wasser)}}$; $M_{\text{(unter Wasser)}}$). Danach werden die Proben 22 Stunden im Trockenschrank bei 50 °C getrocknet und in einen Exsikkator eingebracht. Dieser wird nach dem Aufbringen eines Vakuums geflutet (Steiggeschwindigkeit ca. 5 mm pro Minute).

Die Proben verbleiben für 3 Tage im Exsikkator, bevor sie erneut unter und über Wasser gewogen werden ($M_{V\text{(unter Wasser)}}$; $M_{V\text{(über Wasser)}}$). Nach einer abschließenden 3 täglichen Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C erfolgt die Feststellung des Trockengewichts M_{105} .

Auswertung: Mit Hilfe der ermittelten Probengewichte lassen sich folgende Größen bestimmen:

1) Probenvolumen V

$$V = \frac{M_{\text{(über Wasser)}} - M_{\text{(unter Wasser)}}}{\rho_w} \quad (4.6)$$

mit:

V : Probenvolumen [m^3]

ρ_w : Rohdichte des Wassers ($\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$)

M : Gewicht des Probekörpers in [kg] nach Sättigung unter Atmosphärendruck, gewogen unter und über Wasser

2) Wassergehalt zu Versuchsbeginn u_A

$$u_A = \frac{M_A - M_{105}}{\rho_w \cdot V} \cdot 100 \quad (4.7)$$

mit:

u_A : Wassergehalt der Probe zu Versuchsbeginn bzw. im Anlieferungszustand in [Vol.-%]

M_A : Probengewicht zu Versuchsbeginn in [kg]

M_{105} : Trockengewicht der Probe in [kg]

3) Durch Kapillarleitung füllbare Porosität $\epsilon_{\text{füll}}$ bei Wassersättigung unter Atmosphärendruck in [Vol.-%]

$$\epsilon_{\text{füll}} = \frac{M_{\text{(über Wasser)}} - M_{105}}{\rho_w \cdot V} \cdot 100 \quad (4.8)$$

4) Gesamtporosität ϵ_{ges} (entspricht dem Wassergehalt der Probe am Ende der Wassersättigung unter Vakuum) in [Vol.-%]

$$\epsilon_{\text{ges}} = \frac{M_v(\text{über Wasser}) - M_{105}}{\rho_w \cdot V} \cdot 100 \quad (4.9)$$

5) Trockenrohdichte ρ_{tr} in $[\text{kg/m}^3]$

$$\rho_{\text{tr}} = \frac{M_{105}}{V} \quad (4.10)$$

6) Reindichte ρ in $[\text{kg/m}^3]$

$$\rho = \rho_{\text{tr}} \cdot \frac{100}{100 - \epsilon_{\text{ges}}} \quad (4.11)$$

Anwendungsgrenzen: Wie an Hand der Versuchsauswertung erkennbar ist, kann nur der Mittelwert der Porosität (gilt sowohl für $\epsilon_{\text{füll}}$ wie auch für ϵ_{ges}) der gesamten Probe bestimmt werden. Eine Aussage über das Porositätsgefälle von Betonproben, die oberflächennah entnommen wurden (z.B. Bohrkernabschnitt der Betondeckung), und die, wie in /5/ und /28/ nachgewiesen werden konnte, ein solches Gefälle besitzen, kann mittels dieser Untersuchungen nicht gewonnen werden. Darüberhinaus sind keine Aussagen über die Größe der Poren und die Porenform möglich.

4.3 Herstellung der Versuchswände

4.3.1 Überblick

Im Sommer - Herbst 1987 wurden insgesamt 16 großformatige, bewehrte, wandartige Versuchskörper hergestellt (Bild 4.3.1). Je zwei Wände wurden zu acht verschiedenen Terminen betoniert. Die beiden Wände einer Betonage sind hinsichtlich ihrer Betonzusammensetzung, Herstellung, Nachbehandlung und Bewehrungsanordnung identisch. Sie unterscheiden sich durch den Einbau von Meßelementen. Dabei handelt es sich um Thermoelemente und Stab- bzw. Drahtelektrodenpaare. Die letzteren dienen zur Messung des elektrischen Wi-

derstands des Betons zur Abschätzung seines Feuchtegehaltes. Der Einbau der Elektroden erfolgte in verschiedenen Wandtiefen. Die Lage der Meßelemente ist in Bild 4.3.1 dargestellt. Zur weiteren Unterscheidung wird im Folgenden die Wand ohne Meßelemente zusätzlich mit einem kleinen a, die Wand mit Meßelementen zusätzlich mit einem kleinen b bezeichnet.

Alle Wände werden im Freien aufgestellt. Eine Bohrkernentnahme erfolgt nur an den Wänden ohne Meßelemente (a). Die Wände mit Meßelementen (b) dienen der Anwendung der zerstörungsfreien Absorptionsmeßverfahren, zu deren Durchführung begleitende Temperatur- und Feuchtemessungen erforderlich sind.

Eine Übersicht über die untersuchten Parameter und deren Variation ist in Tab. 4.3.1 enthalten.

4.3.2 Zusammensetzung der Versuchsbetone

Ausgangsstoffe der Betone sind:

- Zement: PZ 35 F
- Zuschlag: Sieblinie B/C-32 nach DIN 1045 bestehend aus Sand-Kies Material des nördlichen Harzvorlandes
- Zusatzmittel: Kalksteinmehl aus dem nördlichen Harzvorland

Die Zusammensetzung der Betone ist Tab. 4.3.1 zu entnehmen.

4.3.3 Herstellung, Frischbetoneigenschaften und Begleitkörper

Die Betonherstellung erfolgte in einem Zwangsmischer. Für die Betonage eines Wandpaares einschließlich der Begleitkörper waren drei Mischungen erforderlich.

Der Mischvorgang erfolgte so, daß zunächst 30 s lang Zuschlag und Zement trocken vorgemischt wurden. Bei laufendem Mischer erfolgte die Anmachwasserzugabe. Der eigentliche Mischvorgang dauerte 120 s.

Um die Gleichmäßigkeit der Mischungen und die Verarbeitungseigenschaften des Betons an sich beurteilen zu können, wurden im Anschluß an den Mischvorgang folgende Frischbetonprüfungen durchgeführt:

- Bestimmung des Ausbreitmaßes (teilweise zusätzlich auch das Verdichtungsmaß),
- Bestimmung der Frischbetonrohddichte,
- Bestimmung des Luftporengehaltes.

Für das Mischen, Einbringen und Verdichten des Betons einschließlich der Herstellung der Begleittkörper wurden pro Wandpaar ca. 2 h benötigt. Der Beton jeder Teilmischung wurde gleichmäßig auf die beiden Wände und eine der Anzahl der Teilmischungen entsprechende Zahl von Begleittkörpern verteilt. Nähere Angaben zu den Begleittkörpern können den Ausführungen von Tab. 4.3.2 entnommen werden.

Die Wände wurden in einer senkrecht stehenden, kunststoffbeschichteten Holzschalung hergestellt. Die Verdichtung erfolgte über Rüttelflaschen und Schalungsrüttler.

Die Frischbetoneigenschaften (Mittelwerte der Teilmischungen) sind Tab. 4.3.3 zu entnehmen. Für alle Betone wurde ein Ausbreitmaß von $a = 40$ cm angestrebt. Versuchsbetonagen zur Ermittlung der notwendigen Zugabe von Fließmittel - bzw. Kalksteinmehl gingen den eigentlichen Betonagen voraus.

Wie Tab. 4.3.3 zeigt, wiesen die Betone der Wände I und II eine zu steife Konsistenz auf ($a = 33$ bzw. 34 cm). Nur die Verdichtungsmaße entsprachen den angestrebten Sollwerten. Für die vorliegende Bauteilgeometrie und Bewehrungsführung erwiesen sich die Konsistenzen dieser Betone als zu steif. Es kam zu Entmischungen und Verdichtungsfehlstellen im Bereich des Wandfußes. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Wänden I und II zu gewährleisten, konnte die Betonzusammensetzung für Wand II gegenüber Wand I nicht verändert werden.

Für die Wände VII und VIII war auf Grund der wasserreichen Zementleimmenge von vornherein eine weiche Konsistenz zu erwarten.

4.3.4 Bewehrungsanordnung

Die Hauptbewehrung jeder Wand besteht aus Einzelstäben mit einem Durchmesser von 12 mm und einem lichten Abstand von 20 mm. Diese Anordnung soll eine Bewehrungskonzentration simulieren. Sie wurde nur auf einer Wandseite angeordnet. Im Folgenden wird diese Wandseite als "bewehrte Wandseite" bezeichnet werden.

Auf der anderen Wandseite wurde eine Betonstahlmatte Q221 mit $c = 15$ mm Betondeckung eingebaut. Im Weiteren wird diese Seite vereinfachend als "unbewehrte Wandseite" bezeichnet.

Wie aus Bild 4.3.1 hervorgeht, wurde die Betondeckung der Einzelstäbe, jeweils auf Bereichen von 30 cm Breite, in Schritten von 5 mm, bei 5 mm beginnend, bis auf 30 mm gesteigert. Jede Wand enthält somit 6 verschiedene Betondeckungen.

4.3.5 Nachbehandlung und Lagerung

Folgende Nachbehandlungsarten wurden ausgeführt:

a) "schlechte Nachbehandlung":

- einen Tag in Schalung
- Lagerung bis zum 28. Tag in der Versuchshalle, unter Ausschluß jeglichen Wasserkontakts
- danach Aufstellung im Freien

Die so nachbehandelten Wände werden mit einer ungeraden römischen Ziffer bezeichnet (I, III, ...) und in den Erläuterungen zu den Versuchsergebnissen abkürzend als nicht nachbehandelte Wände angesprochen.

b) "gute Nachbehandlung"

- einen Tag in Schalung
- bis zum 7. Tag unter feuchten Tüchern und Folie
- unmittelbar danach, Aufstellung im Freien

Die Betonwände mit dieser Nachbehandlung erhalten eine gerade römische Ziffer als Bezeichnung (II, IV ...) und werden als "nachbehandelte Wände" angesprochen.

Die Aufstellung der Wände im Freien erfolgte in Ost-West-Richtung. Die bewehrte Wandseite weist dabei nach Norden. Ihre Neigung gegen die Vertikale beträgt 5°.

4.3.6 Bohrkernentnahme

Wie bereits erwähnt, erfolgt eine Bohrkernentnahme nur aus den Wänden ohne einbetonierte Meßelemente. Die Lage der Bohrkernne ist Bild 4.3.2 zu entnehmen. Die Aufteilung der Bohrkernne in die Prüfkörper für die einzelnen Versuche und weitere Angaben zum Entnahmealter werden in Abschn. 4.4 behandelt.

Die Bohrkernentnahme durch Naßbohrung wurde im Labor durchgeführt. Für den Zeitraum des Bohrens erfolgte somit eine Unterbrechung der Freilagerung. Gebohrt wurde von der unbewehrten zur bewehrten Wandseite. Bei umgekehrter Richtung wäre eine Zerstörung der z.T. sehr dünnen Betondeckungen nicht auszuschließen. Die Bohrlochmantelflächen wurden anschließend durch einen Epoxidharzanstrich versiegelt.

4.3.7 Festbetoneigenschaften

4.3.7.1 Ergebnisse der nach DIN 1048 gelagerten Begleitkörper

Wie Tab. 4.3.2 zu entnehmen ist, wurden für die Prüfung im Alter von 28 Tagen Begleitkörper zur Bestimmung der

- Druckfestigkeit (3 Würfel mit einer Kantenlänge $a = 150 \text{ mm}$)
- Spaltzugfestigkeit (3 Zylinder $\varnothing 150 \text{ mm}$; $h = 300 \text{ mm}$)
- Wassereindringtiefe (3 Wasserplatten)
- und des E-Moduls (1 Zylinder $\varnothing 150 \text{ mm}$; $h = 350 \text{ mm}$)

hergestellt und geprüft. Die Ergebnisse sind in Tab. 4.3.4 wiedergegeben.

Auf die Ergebnisse wird nicht weiter eingegangen, da sie zu dem hier behandelten Forschungsthema keinen direkten Bezug haben. Bei den Ergebnissen der Versuche zur Bestimmung der Wassereindringtiefe fällt allerdings Folgendes auf:

- a) Die Wasserplatten, zugehörig zu Wand III, weisen bei einem w/z -Wert von 0,67 eine vergleichbare Wassereindringtiefe wie die Wasserplatten mit einem w/z -Wert von 0,5 auf. Der Einfluß der Nachbehandlung kann, wie ein Vergleich der Wasserplatten, zugehörig zu Wand III, mit denen, zugehörig zu Wand IV, zeigt, nicht nachgewiesen werden ($e_{IV} = 2,2 \text{ cm} > e_{III} = 0,6 \text{ cm}$).
- b) Gegenüber den Wasserplatten von Wand VII ($e = 0,9 \text{ cm}$) weisen jene von Wand VIII (trotz guter Nachbehandlung) eine ca. 7-fach größere Wassereindringtiefe auf ($e = 6,7 \text{ cm}$). Während das Ergebnis der Wasserplatten, zugehörig zu Wand VIII, den Erwartungen entspricht, kann die geringe Wassereindringtiefe der Wasserplatten von Wand VII nicht erklärt werden.

4.3.7.2 Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung der Erhärtungswürfel

In Bild 4.3.3 ist die Festigkeitsentwicklung der Erhärtungswürfel wiedergegeben. Auch auf diese Ergebnisse wird in diesem Bericht nicht weiter eingegangen.

4.4 Zeitplan der Prüfungen

Entsprechend den Versuchszielen werden folgende Versuche durchgeführt:

- a) Absorptionsmessungen an den Versuchswänden

Bauteilversuche zum Studium des Absorptionsverhaltens der Versuchswände werden bis zu einem Zeitraum von 400 Tagen nach Herstellung der Wände durchgeführt. Die Auswahl der Prüfzeitpunkte und ihre Zuordnung zu den Versuchswänden erfolgte zufällig, um eine zufällige Verteilung der Wettersituation, die der Messung vorausgingen und die zum Meßzeitpunkt herrschten, zu erhalten. Prüfungen, die auf einen Termin

entfielen, zu dem es regnete, wurden - soweit möglich und keine Überschneidung mit anderen Terminen entstand - auf einen Zeitpunkt verschoben, dem eine regenfreie Zeit von mindestens 36 Stunden vorausging. Ließ sich dies wegen der Überschneidung mit einem anderen Prüftermin nicht realisieren, wurde auf die Messung verzichtet. Beabsichtigt waren pro Wand 60 Messungen. Wie Tab. 4.4.1 entnommen werden kann, konnten davon nicht alle durchgeführt werden. Wegen der Abhängigkeit der Durchführung der Prüfung vom Wetter, erklärt sich die unterschiedliche Anzahl der tatsächlich durchgeführten Prüfungen pro Wand.

Von vornherein verzichtet wurde auf Messungen während des Zeitraumes von Dezember 1987 bis April 1988. Das Schwergewicht der Untersuchungen lag bei den ISA-Messungen (40 der 60 beabsichtigten Messungen pro Wand sollten darauf entfallen; 20 Prüfungen waren als Wassereindringprüfung vorgesehen). Diese sollten im doppelten Umfang wie die Wassereindringprüfungen durchgeführt werden. Tab. 4.4.1 gibt einen Überblick über die Prüfanzahl der je Wandalter durchgeführten Prüfungen.

b) Laborversuche zur Messung von Porosität und Dichtigkeit

Dazu wurden den Wänden zu den Zeitpunkten 28, 90, 180 und 360 Tagen bis zu 12 Bohrkerne entnommen (s. Bild 4.3.2). Bei den Bohrkernentnahmen zum Betonalter 180 und 360 Tage kam es zu Verschiebungen des geplanten Bohrtermins von bis zu ± 5 Tagen. Dies wird bei der Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse nicht weiter berücksichtigt.

Die Lage, Form und Größe der Proben, die aus den Bohrkernen hergestellt wurden, kann den Bildern 4.4.1 bis 4.4.4 entnommen werden. Dort ist auch die Probenbezeichnung angegeben. Sie wurde so gewählt, daß sie, neben Angaben zur Herkunft der Probe, einen ersten Hinweis auf die entsprechende Prüfabsicht enthält. Zu allen Altersstufen wurden Proben aus den drei Wandtiefenbereichen

- Betondeckung unterschiedlicher Dicke
- Wandmitte
- unbewehrte Wandseite mit einer Dicke von ca. 30 mm

entnommen. Tab. 4.4.2 gibt einen Überblick über die Anzahl der je Altersstufe und Wandtiefe pro Versuchsart durchgeführten Versuche.

Vom Zeitpunkt der Probenherstellung bis zum Beginn der Prüfung wurden die Proben in Exsikatoren zunächst über Kaliumhydroxid und dann mindestens 10 Wochen im Vakuum getrocknet.

Neben dem in Tab. 4.4.2 dargestellten Versuchsumfang wurden an den Proben, die einer Prüfung der kapillaren Wasserleitfähigkeit und an denjenigen, die einer Vakuumsättigung unterzogen wurden, unmittelbar nach Ende dieser Prüfungen die Karbonatisierungstiefe gemessen. Dies geschah durch Spalten der Proben und Einsprühen der Spaltfläche mit Phenolphthalein. Bei Spaltflächenlänge von ca. 10 cm erfolgte die Messung i.d.R. an vier Stellen im Abstand von ca. 2 cm (weitere Regelungen siehe /29/).

An Proben des Untersuchungsalters 28 Tage der Wände I bis IV erfolgte darüber hinaus die Ermittlung der Porosität mittels Quecksilberdruckporosimetrie.

Über die in die Wände einbetonierten Thermoelemente wurde deren Hydrationswärmeentwicklung gemessen.

Auf alle diese Untersuchungen wird in diesem Bericht nicht eingegangen.

4.5 Festigkeitseigenschaften der Versuchswände

Die zeitliche Entwicklung der Druck- und Spaltzugfestigkeit wurde an Bohrkernabschnitten geprüft, die für die Laboruntersuchungen hinsichtlich Dichtigkeit und Porosität nicht benötigt wurden. Die Abmessungen dieser Bohrkernabschnitte entsprachen deshalb nicht dem üblichen Schlankheitsgrad $h/d = 1,0$.

In den Bildern 4.5.1 (Druckfestigkeit) und 4.5.2 (Spaltzugfestigkeit) sind für die Untersuchungsalter 28 und 360 Tage wiederum nur die Mittelwerte aus jeweils drei Bohrkernabschnitten aufgetragen. Zu den Untersuchungsaltern 90 und 180 Tage reichten die übrigbleibenden Bohrkernabschnitte zu diesem Versuchsumfang nicht aus (90 Tage: 2 x β_D und 1 x β_{SZ} ; 180 Tage: 1 x β_D und 2 x β_{SZ}).

Ein Teil der Proben enthielt Bewehrungsabschnitte der Mattenbewehrung. Diese Proben wurden der Druckfestigkeitsprüfung zugeordnet, bzw. wenn nur derartige Bohrkernabschnitte zur Verfügung standen, wurden die Proben für die Spaltzugfestigkeitsprüfung entsprechend verkürzt, so daß nur der bewehrungsfreie Rest des Bohrkerns geprüft wurde. Dadurch ergeben sich z.T. sehr geringe Probenhöhen. Von Wand II, III und IV wurden für das Untersuchungsalter 360 Tage keine Festigkeitsprüfungen durchgeführt. Auf eine weitere Kommentierung der Ergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet.

4.6 Ergebnisse der Laborversuche

4.6.1 Einleitung

Versuchsumfang:

Aus den acht verschiedenen Wänden (vier verschiedene Betonzusammensetzungen mit je zwei Nachbehandlungsarten) wurden zu vier verschiedenen Altersstufen (28, 90, 180 und 360 Tage), aus bis zu acht Wandtiefen (sechs verschiedene Betondeckungen, Wandmitte, oberflächennaher Bereich der nicht bewehrten Wandseite) bis zu drei Proben hergestellt und geprüft.

Meßgrößen:

Folgende Betoneigenschaften wurden in den einzelnen Versuchsarten gemessen:

a) Versuche zur kapillaren Wasserleitung

- der Wasseraufnahmekoeffizient A [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{h})$]
- der Wassereindringkoeffizient B [m/\sqrt{h}]
- die Wasserkapazität ψ [Vol.-%]

b) Versuche zur CO_2 -Diffusion

- der CO_2 -Diffusionskoeffizient D_{CO_2} [m^2/h]

c) Versuche zur Wassersättigung

- die unter Atmosphärendruck füllbare Porosität $\varepsilon_{\text{füll}}$ [Vol.-%]
- die unter Vakuum füllbare Porosität ε_{ges} [Vol.-%]

Die Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt nach folgender Gliederung:

Abschnitt 4.6.2:

Getrennt für jede Wand werden die Ergebnisse obiger Messungen wiedergegeben. Dies geschieht gesondert nach den Tiefenbereichen:

- Betondeckung unterschiedlicher Dicke
- Wandmitte
- oberflächennaher Bereich der nicht bewehrten Wandseite (im folgenden durch die Bezeichnung "unbewehrter Rand" bzw. unbewehrte Wandseite charakterisiert)

für alle vier Untersuchungsalter. Durch diese Darstellungen werden alle Versuchsergebnisse erfaßt.

In den weiteren Abschnitten erfolgt (z.T. für eine aus dem Gesamtumfang der Versuchsergebnisse ausgesuchte Teilmenge) eine detailliertere Erläuterung der Versuchsergebnisse.

Abschnitt 4.6.3:

Für vier ausgesuchte Wandtiefen (Betondeckungen $c = 0,5$ und $3,0$ cm; Wandmitte; unbewehrter Rand) soll die Abhängigkeit der Dichtigkeit und Porosität von

- der Betonzusammensetzung (hier: w/z-Wert und Zementgehalt)
- der Nachbehandlungsart
- dem Betonalter und der Wandtiefe

aufgezeigt werden.

Abschnitt 4.6.4:

Auf der Grundlage aller vorliegenden Versuchsergebnisse soll untersucht werden, inwieweit empirische Beziehungen bestehen zwischen

- Kapillarleitung und Diffusion

- Dichtigkeit und Porosität

Dabei wird insbesondere der Fragestellung nachgegangen, ob die alleinige Angabe der Größe der Porosität hinreichend ist zur Charakterisierung der Dichtigkeitseigenschaften.

Im Abschnitt 4.7 werden die Bauwerksmessungen in gleichartiger Weise besprochen.

4.6.2 Allgemeine Darstellung der Versuchsergebnisse

4.6.2.1 Fragestellungen

Mit Hilfe der allgemeinen Darstellung aller Versuchsergebnisse wird ein erster Einblick in die vorliegenden Dichtigkeits- und Porositätsverhältnisse der Versuchswände gewonnen. Er ist Grundlage weiterer Ausführungen in den folgenden Abschnitten.

In Abhängigkeit des betrachteten Wandbereiches (Untersuchungstiefe) erfolgen Erörterungen zu folgenden Fragestellungen.

- Für die Betondeckung:

- a) Hat die Dicke der Betondeckung (für die hier gewählte Bewehrungsanordnung) einen Einfluß auf die Dichtigkeit und Porosität des Betons der Betondeckung?
- b) Ist der Einfluß der Auslagerungsdauer auf die Dichtigkeits- und Porositätskennwerte erkennbar? Ist die zeitliche Entwicklung für alle Betondeckungsdicken gleich?
- c) Wie wirkt sich die Nachbehandlung zu den untersuchten Altersstufen auf die verschiedenen Betondeckungsdicken aus? Hat die Nachbehandlungsart auf die Größe und Streubreite der Dichtigkeit und Porosität einen Einfluß? (Wiederum unter dem Gesichtspunkt des Vergleichs der verschieden dicken Betondeckungen und Betonalter.)

- d) Lassen sich Abhängigkeiten bzw. Besonderheiten der Betoneigenschaften von der Betonzusammensetzung erkennen? Welchen Einfluß hat die Betonzusammensetzung auf das zeitliche Verhalten?

- Für die Proben der Wandmitte:

- e) Ist eine zeitliche Entwicklung der Dichtigkeits- und Porositätskennwerte erkennbar?
- f) Läßt ein Vergleich der Wände gleicher Zusammensetzung, aber unterschiedlicher Nachbehandlung erwarten, daß zu verschiedenen Herstellungsdaten produzierte Betone gleicher Zusammensetzung gleiche Eigenschaften haben? Erlaubt dies Rückschlüsse auf einen Vergleich der Wände a und b?
- g) Welchen Einfluß hat die Betonzusammensetzung auf die Größe und Streubreite der Werte und ihre zeitliche Entwicklung?
- h) Vergleich der Ergebnisse von Untersuchungen der Betondeckungsbereiche mit denen der Wandmitte hinsichtlich der Relation der Größenordnung und Streubreite der Werte.

- Für den oberflächennahen Bereich der unbewehrten Wandseite (unbewehrter Rand):

- i) Ist eine zeitliche Entwicklung der Dichtigkeits- und Porositätskennwerte erkennbar?
- j) Wirkt sich die Nachbehandlung zu allen Altersstufen gleich aus? Welche Parallelitäten oder Unterschiede ergeben sich zu den Ergebnissen der Betondeckung?
- k) Welchen Einfluß hat die Betonzusammensetzung auf die Größe und Streubreite der Werte und ihre zeitliche Entwicklung?
- l) Vergleich der Ergebnisse Wandmitte und unbewehrter Rand sowie Betondeckung und unbewehrter Rand, hinsichtlich der Relation der Größenordnung und Streubreite der Werte.

Diese Fragestellungen werden zu jeder gemessenen Eigenschaft gesondert untersucht. Die dabei festgestellten allgemeinen Tendenzen werden in tabellarischer Form wiedergegeben (s. Tab. 4.6.2 bis 4.6.4).

Begleitende Hinweise und Begründungen für Besonderheiten, die vom allgemeinen Verhalten abweichen, werden nicht gegeben. Zur besseren Übersicht enthält Tab. 4.6.1 eine Übersicht, in welchen Bildern welche Betoneigenschaft dargestellt ist.

Als Streubreite wird dabei, je nach Fragestellung, derjenige Wertebereich bezeichnet, innerhalb dessen die Meßwerte aller jeweils zusammenfassend betrachteten Wandtiefen liegen, bzw. derjenige Bereich, innerhalb dessen die Werte aller Versuche einer Wandtiefe liegen.

4.6.2.2 Versuchsergebnisse

In den Tabellen 4.6.2 bis 4.6.4 werden Aussagen (gültig für alle acht Wände) zur Dichtigkeit und Porosität gegeben. Diese Angaben sind die Antworten auf die in Abschnitt 4.6.2.1 gestellten Fragen.

Die Angaben der Tabellen 4.6.2 bis 4.6.4 lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Die Dicke der Betondeckung übt auch im Fall einer Bewehrungskonzentration und bei einer Betonzusammensetzung mit einem nicht darauf abgestimmten Größtkorndurchmesser des Zuschlags keinen Einfluß auf die Dichtigkeit und Porosität des Betons der Betondeckung aus. Alle Betondeckungen weisen - unabhängig von ihrer Dicke - vergleichbare Betoneigenschaften hinsichtlich des Transports von Gasen und Flüssigkeiten auf.
2. Der Einfluß der Auslagerungszeit auf die zeitliche Entwicklung der untersuchten Eigenschaften - bedingt durch Nachhydratation und Karbonatisierung, die für die hier vorliegenden Verhältnisse zu einer Abnahme der Durchlässigkeit und Porosität führen müßten - ist nicht für alle Eigenschaften und nicht in allen untersuchten Tiefenbereichen gegeben.

3. Der Einfluß der Nachbehandlung ist begrenzt. Bei einem Vergleich der beiden hier angewandten Nachbehandlungsarten, läßt sich i.d.R. nur für die 28 Tage alten Proben eine Nachbehandlungswirkung erkennen. In vielen Fällen führt die gute Nachbehandlung zu einer Verringerung der Streubreite der Ergebnisse (beim Vergleich aller Betondeckungen der nicht nachbehandelten Wand mit denjenigen der ansonsten gleichartigen nachbehandelten Wand bzw. beim Vergleich der verschiedenen Altersstufen).
4. Die Betonzusammensetzung (hier insbesondere der w/z-Wert und der Zementgehalt) übt, wie nicht anders zu erwarten, den größten Einfluß auf die Betonqualität aus. Dies gilt allerdings nur eingeschränkt für die füllbare Porosität und die Gesamtporosität (Näheres s. Abschn. 4.6.3.2).
5. Ein Vergleich der untersuchten Tiefenbereiche zeigt in vielen Fällen keine Unterschiede der Dichtigkeit und Porosität. Wo dies nicht zutrifft, sind die Unterschiede zwischen den Wandtiefenbereichen von der Betonzusammensetzung abhängig (also nicht für alle Wände von gleicher Art und Intensität) und derartig, daß sich i.d.R. die größte Dichtigkeit und kleinste Porosität für die Proben der Wandmitte ergibt.
6. Mit Ausnahme des Wandpaares III und IV haben die übrigen Wandpaare gleicher Zusammensetzung, aber unterschiedlicher Nachbehandlung, trotz ihrer Herstellung in verschiedenen Betonagen, vergleichbare Eigenschaften (bei Betrachtung der Ergebnisse für Proben der Wandmitte). Dies läßt erwarten, daß die an den Wänden a (aus denen ausschließlich die Bohrkernentnahme erfolgte) gewonnenen Versuchsergebnisse auf für die Wände b (an denen ausschließlich Bauteilmessungen durchgeführt werden sollen) als repräsentativ angesehen werden können.
7. Bei den Versuchen zur Bestimmung des Diffusionskoeffizienten ergibt sich eine Abhängigkeit des Meßwertes von der Probendicke (Zunahme des Diffusionskoeffizienten mit zunehmender Probendicke). Dies gilt für alle untersuchten Wandbereiche und Altersstufen. Eine Erklärung für dieses Verhalten konnte nicht gefunden werden.

4.6.3 Dichtigkeits- und Porositätseigenschaften in Abhängigkeit betontechnologischer Parameter

4.6.3.1 Einleitung

Abschnitt 4.6.3 soll Aufschluß geben über die Abhängigkeit der Dichtigkeit und Porosität von wesentlichen Einflußgrößen wie:

- Betonzusammensetzung (Abschnitt 4.6.3.2)
- Nachbehandlung (Abschnitt 4.6.3.3)
- Betonalter (Abschnitt 4.6.3.4)
- Wandtiefe (Abschnitt 4.6.3.4)

Es werden somit nicht mehr die Versuchsergebnisse gesondert für jede Wand betrachtet, sondern es findet ein Vergleich der Wände miteinander statt. Dieser Vergleich erfolgt nicht für die Gesamtheit der Ergebnisse. Statt dessen - um den Umfang der weiteren Ausführungen zu begrenzen - wird daraus eine Auswahl getroffen, die von dem jeweils zu betrachtenden Parameter abhängig ist. Dies bezieht sich gleichermaßen auf eine Auswahl näher zu betrachtender Altersstufen, wie auch auf ausgewählte Wandtiefen.

Für die Abschnitte 4.6.3.2 und 4.6.3.3 werden nur die Ergebnisse der 28 Tage alten Proben der Betondeckungen der Dicke $c = 0,5$ cm und $c = 3,0$ cm, die der Wandmitte und die für die Proben des unbewehrten Rands betrachtet. Die Berücksichtigung von nur zwei der sechs untersuchten Betondeckungen ist dadurch gerechtfertigt, daß in Abschn. 4.6.1 keine Unterschiede zwischen den verschieden dicken Betondeckungen festgestellt werden konnten. Die Beschränkung auf 28 Tage alte Proben berücksichtigt den Umstand, daß nur an den Ergebnissen dieser Proben die Wirkung einer Nachbehandlung erkannt werden konnte.

Für Abschnitt 4.6.3.4 werden nur die Wände I - IV berücksichtigt. Dies sind die Wände baupraktisch relevanter Zusammensetzung.

Hierzu werden für die zuvor ausgewählten Tiefen die Werte aller Altersstufen herangezogen.

Diese Auswahl gilt für alle untersuchten Baustoffeigenschaften. Für den CO_2 -Diffusionskoeffizienten werden allerdings nur die Versuche, die an Proben mit einer Dicke d von $9,0 \text{ mm} \leq d \leq 11 \text{ mm}$ durchgeführt wurden, berücksichtigt. Dies ist erforderlich, um Überlagerungen des zu untersuchenden Einflusses mit dem Einfluß aus der Probendicke auszuschließen (es werden hierbei die Werte aller Altersstufen berücksichtigt).

4.6.3.2 Einfluß der Betonzusammensetzung

Die Parameter der Betonzusammensetzung sind hier an erster Stelle:

- w/z-Wert
- Zementgehalt

Auf den Einfluß der aus verarbeitungstechnischen Gründen erforderlichen mischungsabhängigen Gesteinsmehlzugabemenge wird nicht weiter eingegangen.

Für jede Nachbehandlungsart wurden die beiden Parameter gleichzeitig variiert. Somit wird auch durch die Versuchsergebnisse die gemeinsame Wirkung beider Einflußgrößen wiedergegeben. Die Variation der beiden Parameter erfolgte so, daß eine Erhöhung des w/z-Werts mit einer Abnahme des Zementgehalts verbunden war. Da die Konsistenz aller Betone gleich sein sollte, ergab sich die Bedingung, ein konstantes Verhältnis von Zuschlaganteil zu Zementleimanteil einzuhalten. Alle Betone weisen somit eine vergleichbare Verarbeitbarkeit auf. Herstellungsbedingte Unterschiede in der Zementsteinstruktur können deshalb, zumindest näherungsweise, als unabhängig vom Zementgehalt angesehen werden. Auf dieser Voraussetzung beruht die Annahme, daß die ausgeführten Variationen der Betonzusammensetzung zwei gegenläufige Tendenzen zur Folge haben: Eine Erhöhung des w/z-Werts führt auf eine Abnahme der Dichtigkeit und Zunahme der Porosität; eine Verringerung des Zementgehalts führt zu einer Zunahme der Dichtigkeit und Abnahme der Porosität. Diese gegenläufige Tendenz ist bei der Interpretation der Versuchsergebnisse zu beachten.

Neben der Frage nach der Art der Abhängigkeit der betrachteten Eigenschaften vom w/z-Wert und Zementgehalt, sowie der Größenordnung dieser Abhängigkeit, soll insbesondere dem Einfluß der lokalen Herstellungsbedingungen un-

terschiedlicher Wandzonen nachgegangen werden. Dies ist die Frage nach Abweichungen von der mittleren Betonzusammensetzung in den unterschiedlich dicken Betondeckungen. Falls sie nachweisbar sind, ergibt sich zwangsläufig das Problem, inwieweit es vertretbar ist, Meßwerte über Angaben zur mittleren Betonzusammensetzung aufzutragen, wenn die vorhandenen Betonzusammensetzungen signifikant davon abweichen.

Auch hier wird zunächst jede untersuchte Betoneigenschaft für sich abgehandelt, und anschließend werden die sich daraus ergebenden allgemeinen Schlußfolgerungen gezogen. Da dem w/z-Wert der größte Einfluß einzuräumen ist, sind die Versuchsergebnisse nur über diesen aufgetragen.

Einfluß der Betonzusammensetzung auf den Wasseraufnahmekoeffizienten (Bilder 4.6.145 und 4.6.146).

Für die hier untersuchten Betonzusammensetzungen führt die Verdoppelung des w/z-Werts von 0,5 auf 0,98 zu einer Verdreifachung des Wasseraufnahmekoeffizienten von ca. 0,5 auf ca. $1,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{h}$ bei nicht nachbehandelten Wänden und von ca. 0,4 auf ca. $1,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{h}$ bei nachbehandelten Wänden. Unabhängig vom w/z-Wert sind i.d.R. die Wasseraufnahmekoeffizienten der Proben der unbewehrten Wandseite kleiner als jene von Proben aus der Wandmitte bzw. der Betondeckung (für w/z = 0,5 nicht eindeutig trennbar). Mit wachsendem w/z-Wert nimmt außerdem der Abstand der Werte der unbewehrten Wandseite zu denen der übrigen Tiefen zu. Eine für alle w/z-Werte gleichbleibende Reihenfolge unter den verschiedenen oberflächennahen Wandzonen gibt es nicht.

Anhand der hier dargestellten Ergebnisse läßt sich ein systematischer Einfluß der lokalen Verhältnisse, der sich z.B. in einer immer gleichen Reihenfolge der dargestellten Wandtiefen ausdrücken würde, nicht ablesen. Ob ein Teil der großen Streubreite bei Betonen mit hohem w/z-Wert auf lokale Schwankungen des w/z-Werts und der Zementleim bzw. Zementsteinmenge zurückzuführen ist, kann somit nicht eindeutig bestimmt werden.

Einfluß der Betonzusammensetzung auf den Wassereindringkoeffizienten (Bilder 4.6.147 und 4.6.148).

Daß die Betonzusammensetzung einen Einfluß auf die Größe und Streubreite des Wassereindringkoeffizienten ausübt, ist nicht erkennbar. Für alle Wände

schwanken die Werte des Wassereindringkoeffizienten zwischen 0,005 und 0,015 m/ \sqrt{h} . Auf Grund dieser großen Streubreite erscheint es nicht sinnvoll, für die einzelnen Wände charakteristische Werte anzugeben und die Wände miteinander zu vergleichen.

Der Wassereindringkoeffizient wird hier über die gemessenen Werte des Wasseraufnahmekoeffizienten und der Wasserkapazität bestimmt. Die auf diese Art ermittelten Wassereindringkoeffizienten sind offenbar zur Quantifizierung der Betonqualität und Dichtigkeit nicht geeignet, da mit ihnen eine Unterscheidung zwischen dauerhaften und nicht dauerhaften Betonen nicht möglich ist. Für eine sichere Aussage muß der Wassereindringkoeffizient direkt aus der gemessenen Wassereindringtiefe bestimmt werden.

Hier nicht ausgeführte theoretische Betrachtungen ergeben, daß der Wassereindringkoeffizient nicht von der Größe der Porosität abhängt /30/. Er wird durch die Größe der Porenradien und die Porenform bestimmt und hängt vom geometrischen Verbund der Poren im Porensystem ab. Inwieweit diese Größen von Parametern der Betonzusammensetzung beeinflußt werden, wird in den Ausführungen zu Bild 4.6.153 angesprochen werden.

Einfluß der Betonzusammensetzung auf die Wasserkapazität (Bilder 4.6.149 und 4.6.150).

Für die Wasserkapazität ergeben sich dem Wasseraufnahmekoeffizienten analoge Abhängigkeiten. Eine Verdoppelung des w/z-Werts von 0,5 auf 0,98 führt zu einer Verdreifachung der Wasserkapazität von ca. 5 Vol.-% auf ca. 15 Vol.-%. Auch hier konzentrieren sich die Werte der unbewehrten Wandseite für jede Betonzusammensetzung am unteren Ende der jeweiligen Streubreite aller Werte. Eine systematische Rangfolge der Werte der verschiedenen dicken Proben aus unterschiedlichen Wandzonen gibt es auch hier nicht. Nur die Werte der Betondeckung $c = 0,5$ cm liegen regelmäßig über denjenigen für $c = 3,0$ cm. Die Streubreite der dargestellten Ergebnisse liegt je untersuchter Betonzusammensetzung in absoluten Zahlen bei 4 - 5 Vol.-%.

Einfluß der Betonzusammensetzung auf die füllbare Porosität (Bilder 4.6.151 und 4.6.152).

Eine Verdoppelung des w/z -Werts von 0,5 auf 0,98 führt zu einer Zunahme der durch Wasserlagerung unter Atmosphärendruck füllbaren Porosität um den Faktor 1,5 von 12 Vol.-% auf 18 Vol.-%. Wie für die Wasserkapazität, liegen auch hier die Werte für den unbewehrten Rand im unteren Teil des Streubereichs aller dargestellten Werte und durchgängig die Werte für $c = 0,5$ cm über denen für $c = 3,0$ cm. Das Verhältnis der betrachteten Betondeckungen zu den übrigen Tiefen zeigt dagegen keine regelmäßig wiederkehrende Reihenfolge.

Die Streubreite der dargestellten Werte liegt bei ca. 4 Vol.-%. Dies gilt gleichermaßen für alle Betonzusammensetzungen.

Im Bild 4.6.153 ist als weitere Baustoffeigenschaft das Verhältnis von Wasserkapazität zu füllbarer Porosität über dem w/z -Wert aufgetragen. Die füllbare Porosität stellt den Endwert des kapillar füllbaren Porenraums dar, der in Versuchen zur kapillaren Wasserleitung für Saugzeiten $t \rightarrow \infty$ erreicht werden würde. Dieses Verhältnis gibt somit an, welcher Anteil der maximal füllbaren Porosität im Falle einer kapillaren Durchfeuchtung wassergefüllt ist. Es ergibt sich eine erste Information über den Aufbau des Porensystems: Je kleiner dieses Verhältnis, desto dichter ist der Beton; denn zu einem umso größeren Teil sind die Poren mit einem Durchmesser, der für einen kapillaren Transport zugänglich ist, mit Poren "durchsetzt", die aufgrund ihrer Größe nicht zugänglich sind. Nur diese kapillar zugänglichen Poren bestimmen die Wassereindringgeschwindigkeit. Wie die Bilder 4.6.147 und 4.6.148 zeigen, sind sie in allen hier untersuchten Betonen vorhanden, was die Unabhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten von der Betonzusammensetzung erklären würde. Dies verdeutlicht nochmals die Bedeutung des Wassereindringkoeffizienten: Er gibt nur an, mit welcher Geschwindigkeit Beton durchfeuchtet wird, ohne erkennen zu lassen, mit welcher Feuchtemenge (entspricht der Wasserkapazität) dies geschieht. Mit dem Verhältnis $(\psi/\epsilon_{\text{füll}})$ können keine weiteren Beziehungen zwischen dem Porensystem und dem Wassereindringkoeffizienten hergestellt werden. Dieses Verhältnis enthält keine Aussage über die Größe von z.B. Porenradien, sondern nur über

das Verhältnis von Porositäten, die auf unterschiedliche Radienbereiche entfallen.

Wie Bild 4.6.153 zeigt, ist das Verhältnis ψ zu $\epsilon_{\text{füll}}$ bis zu einem w/z-Wert von schätzungsweise w/z = 0,75 vom w/z-Wert abhängig und danach konstant. Der Einfluß des Zementgehalts spielt bei diesen Betrachtungen keine Rolle.

Im Betonalter von 28 Tagen schwankt das Verhältnis $\psi/\epsilon_{\text{füll}}$ für w/z = 0,5 zwischen 0,2 und 0,55 und steigt für w/z = 0,98 auf Werte von 0,8 bis 0,9 an. Die Streubreite der Werte nimmt dabei stark ab. Je größer der w/z-Wert, desto größer ist der Anteil der Porosität, der im Falle einer Durchfeuchtung wassergefüllt ist.

Einfluß der Betonzusammensetzung auf die Gesamtporosität (Bilder 4.6.154 und 4.6.155).

Da sich für die hier vorliegenden Verhältnisse die Gesamtporosität und die füllbare Porosität nur um den Betrag $\Delta\epsilon \approx 1 - 3 \text{ Vol.-%}$ unterscheiden, gelten für die Gesamtporosität, der füllbaren Porosität analoge Verhältnisse. Auf weitere Einzelheiten wird hier nicht eingegangen.

Einfluß der Betonzusammensetzung auf den CO_2 -Diffusionskoeffizienten (Bilder 4.6.156 und 4.6.157).

Für ca. 10 mm dicke Proben zeigt der Diffusionskoeffizient eine deutliche Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung. Eine Verdoppelung des w/z-Werts von 0,5 auf 0,98 führt auf eine Versechsfachung des CO_2 -Diffusionskoeffizienten von ca. $0,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$ auf ca. $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$. Dies gilt gleichermaßen für alle Betonbereiche, wobei durch die Darstellung aller Betonalter nähere Einzelheiten über unterschiedliches Verhalten der Proben aus verschiedenen Wandtiefen nicht gegeben werden können.

Zusammenfassung der dauerhaftigkeitsrelevanten Erkenntnisse:

1. Die Proben des unbewehrten Rands sind dichter und weniger porös als die der übrigen Tiefen. Die übrigen Tiefen sind i.d.R. nicht weiter unterscheidbar, auch wenn durchgängig die Porosität der Proben aus der Betondeckung mit $c = 0,5 \text{ cm}$ größer als diejenige der Betondeckung

$c = 3,0 \text{ cm}$ ist. (für die gemessenen Dichtigkeiten ist ein solches Verhältnis nicht erkennbar).

2. Die Streubreite der Ergebnisse der Dichtigkeitsprüfungen nimmt (bei Betrachtung der Absolutwerte der Streuung) mit wachsendem w/z -Wert zu. Die Streubreite der Porositätsmessungen ist dagegen unabhängig von der Betonzusammensetzung für alle w/z -Werte gleich groß.
3. Der Einfluß des w/z -Werts auf die Größe der Dichtigkeitseigenschaften und die Wasserkapazität ist wesentlich deutlicher ausgeprägt als auf die der Porosität.
4. Daraus folgt, daß es keine von der Betonzusammensetzung unabhängige, aber trotzdem eindeutige, Beziehungen zwischen Porosität und Dichtigkeit gibt. Dies verdeutlicht die Betrachtung des Verhältnisses Wasserkapazität zu füllbarer Porosität: Je niedriger der w/z -Wert, desto komplexer ist der Aufbau des Porensystems, denn desto geringer ist der Anteil der zugänglichen Porosität, der an einem kapillaren Wassertransport beteiligt ist. Somit ist nicht nur die Größe der Porosität maßgebend für die Dichtigkeits- und Transporteigenschaften des Betons, sondern der transportrelevante Anteil der Porosität. Somit können aber auch Betone gleich großer (füllbarer) Porosität unterschiedliche Dichtigkeiten aufweisen, was trotz gleicher Porosität unterschiedliche Dauerhaftigkeiten ergibt.
5. Die Dicke der Betondeckung bzw. Besonderheiten in verschiedenen Wandtiefen üben keinen signifikanten Einfluß aus, so daß für die verschiedenen Wandtiefen systematische Abweichungen, von einer allgemeinen Abhängigkeit der Baustoffeigenschaften von der Betonzusammensetzung, nicht gegeben sind. Lokale Besonderheiten gehen in der Streubreite der Werte unter und führen (unter anderem), wie die Bauwerksmessungen zeigen werden, zu einem entsprechend großen Variationskoeffizienten derartiger Messungen.

4.6.3.3 Einfluß der Nachbehandlung

Die Abhängigkeit der Dichtigkeit und Porosität von der Ausführung einer Nachbehandlung läßt sich am

- Einfluß auf die Größe der entstandenen Dichtigkeit und Porosität
- und am Einfluß auf die Größe der Streuung der Meßergebnisse

aufzeigen. Daneben soll auch hier untersucht werden, ob die festgestellten Abhängigkeiten von der Dicke der Betondeckung beeinflußt werden.

Aus den Darstellungen, die schon zum Einfluß der Betonzusammensetzung herangezogen wurden, ergibt sich für die einzelnen Betoneigenschaften:

Einfluß der Nachbehandlung auf den Wasseraufnahmekoeffizienten (Vergleich Bild 4.6.145 mit 4.6.146).

Sowohl die Werte der beiden dargestellten Betondeckungen, als auch die für den unbewehrten Rand verringern sich durch Anwendung einer Nachbehandlung um bis zu ca. 25 %. Ebenfalls verringert sich die Streubreite der Werte. Die Nachbehandlung hat dagegen keinen Einfluß darauf, daß die Werte der Proben des unbewehrten Rands kleiner sind als die der übrigen Tiefen. Die auffälligste Veränderung ergibt sich beim Vergleich der beiden dargestellten Betondeckungen: Für nicht nachbehandelte Betondeckungen sind die Werte der Betondeckung $c = 0,5$ cm größer bzw. gleich denen der Betondeckung $c = 3,0$ cm. Für die nachbehandelten Wände ist der Wasseraufnahmekoeffizient der Betondeckung $c = 0,5$ cm z.T. erheblich kleiner als derjenige der Betondeckung $c = 3,0$ cm.

Einfluß der Nachbehandlung auf den Wassereindringkoeffizienten (Vergleich Bild 4.6.147 mit 4.6.148).

Aus den im vorigen Abschnitt genannten Gründen ist keine Aussage zum Nachbehandlungseinfluß möglich.

Einfluß der Nachbehandlung auf die Wasserkapazität (Vergleich Bild 4.6.149 mit 4.6.150) und die füllbare Porosität (Vergleich Bild 4.6.151 mit 4.6.152).

Der Einfluß der Nachbehandlung ist weder an Hand der Größe, noch an Hand der Streubreite der Meßwerte erkennbar.

Einfluß der Nachbehandlung auf das Verhältnis Wasserkapazität zu füllbarer Porosität (Bild 4.6.153)

Da für die nicht nachbehandelte Wand mit einem w/z -Wert von 0,67, an den Proben zur Ermittlung der Eigenschaften der kapillaren Wasserleitung, keine Porositätsmessungen durchgeführt wurden, läßt sich nur für die Wände mit einem w/z -Wert von 0,5 der Nachbehandlungseinfluß nachweisen. Die Ausführung einer Nachbehandlung führt auf eine Zunahme der Dichtigkeit, d.h. der Verhältniswert wird kleiner.

Einfluß der Nachbehandlung auf die Gesamtporosität (Vergleich Bild 4.6.154 mit 4.6.155)

Auch für die Gesamtporosität ist ein Einfluß der Nachbehandlung nicht erkennbar.

Einfluß der Nachbehandlung auf den CO_2 -Diffusionskoeffizienten (Vergleich Bild 4.6.156 mit 4.6.157)

Der CO_2 -Diffusionskoeffizient wird ebenfalls nicht von der Nachbehandlungsart beeinflusst.

Zusammenfassung:

1. Nur der Wasseraufnahmekoeffizient wird durch die Nachbehandlung signifikant beeinflusst.
2. Die Einwirkungstiefe einer Nachbehandlung ist begrenzt.

4.6.3.4 Einfluß des Betonalters und der Entnahmetiefe

Die bisherigen Ausführungen von Abschnitt 4.6.3 bezogen sich nur auf Proben, die im Betonalter von 28 Tagen entnommen worden waren. Deshalb wird in den Bildern 4.6.158 bis 4.6.177 dem Einfluß des Alters auf die Eigenschaften des Betons der Wände I - IV nachgegangen. Es werden - wie bisher - die vier Untersuchungstiefen, Betondeckungen der Dicke $c = 0,5 \text{ cm}$ und $c = 3,0 \text{ cm}$, Wandmitte und unbewehrte Wandseite betrachtet. Neben der zeitlichen

Entwicklung der Größe und Streubreite der untersuchten Betoneigenschaften interessieren auch hier:

- Unterschiede im Alterungsverhalten der verschiedenen Wandtiefen entsprechend den unterschiedlichen Witterungsintensitäten, Karbonatisierungs- und Hydratationsbedingungen.
- Bedeutung des Alterseinflusses für nachbehandelte und nicht nachbehandelte Wände in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung.

Auf eine Darstellung der Versuchsergebnisse der Messungen des CO_2 -Diffusionskoeffizienten wird hierbei verzichtet.

Es ergeben sich folgende allgemeine Erkenntnisse:

1. Der Großteil der zeitlichen Entwicklung ist bis zum Alter von 90 Tagen abgeschlossen. Spätestens ab diesem Zeitpunkt ändern sich (bis zum Alter von 360 Tagen) die Meßwerte nur noch unwesentlich. In der Regel betrifft dies sowohl die Rangordnung der betrachteten Wandtiefen zueinander, als auch die Streubreite der Werte (bei Betrachtung der Dichtigkeits- und Porositätsunterschiede zwischen den vier dargestellten Wandtiefen).
2. Bis zum Alter von 90 Tagen tritt eine Verbesserung der Dichtigkeit ein (dies gilt nicht für die Porositätsentwicklung). Teilweise sind in Folge dieser Veränderung die bisherigen Aussagen zum Einfluß der Nachbehandlung und Betonzusammensetzung zu relativieren, so daß die Verhältnisse des Betonalters 28 Tage nicht auch zu späteren Betonaltern uneingeschränkt gelten. Entsprechend den unterschiedlichen Nachhydratationsbedingungen kommt es zu einer Verringerung der Streubreite um bis zu 50 %.

Eine Beurteilung der Dauerhaftigkeit nur auf Basis von Messungen unmittelbar nach dem Ausschalen bzw. am Ende der Nachbehandlung, ist beim gegenwärtigen Kenntnisstand nicht ausreichend.

3. Das beobachtete Alterungsverhalten gilt für die beiden hier betrachteten Betonzusammensetzungen ($w/z = 0,5$ und $w/z = 0,67$) in gleicher Weise.

4. Die Nachbehandlung hat nur einen eingeschränkten Einfluß: Spätestens ab dem Betonalter von 90 Tagen sind die Ergebnisse unterschiedlich nachbehandelter Wände von gleicher Größenordnung und zeigen eine gleichwertige zeitliche Entwicklung.
5. Im Vergleich zur zu erwartenden Dauerhaftigkeit der Versuchswände I - IV von mehreren Jahrzehnten, ist der hier untersuchte Zeitraum von einem Jahr zu kurz, um nachweisen zu können, daß sich die unterschiedlichen Beanspruchungs- und Hydratationsbedingungen verschiedener Wandtiefen, signifikant auf deren Dichtigkeit und Porosität ausgewirkt hätten.

4.6.4 Gegenseitige Abhängigkeit der untersuchten Betoneigenschaften

4.6.4.1 Porosität und Dichtigkeit (Bilder 4.6.178 - 4.6.191)

Da der Transport von Gasen und/oder Flüssigkeiten nur in den Poren eines Baustoffs stattfinden kann, ist es naheliegend, die Art der Beziehung zwischen Porosität und Dichtigkeit näher zu untersuchen. Dies betrifft folgende Zusammenhänge:

- Einfluß der Wasserkapazität, der füllbaren Porosität und der Gesamtporosität auf die Größe des Wasseraufnahmekoeffizienten (Abschnitt 4.6.4.1.1)
- Einfluß der Wasserkapazität, der füllbaren Porosität und der Gesamtporosität auf die Größe des Wassereindringkoeffizienten (Abschnitt 4.6.4.1.2)
- Einfluß der Wasserkapazität auf die Größe des CO₂-Diffusionskoeffizienten (Abschnitt 4.6.4.1.3) (Wasserkapazität stellvertretend für die untersuchten Porositäten)
- Einfluß des Verhältnisses Wasserkapazität zu füllbarer Porosität auf die Größe des Wasseraufnahmekoeffizienten und die Größe des Wassereindringkoeffizienten (Abschnitt 4.6.4.1.1)

- Einfluß des Produkts aus dem Verhältnis Wasserkapazität zu füllbarer Porosität mit der Wasserkapazität auf die Größe des Wasseraufnahmekoeffizienten und des Wassereindringkoeffizienten (Abschnitt 4.6.4.1.2)

In die dazu erforderlichen Darstellungen werden alle vorliegenden Versuchsergebnisse aufgenommen. Da zu einer Altersstufe die Werte der verschiedenen Wandtiefen in einem mehr oder weniger großen Streubereich liegen, ist es vertretbar, in diesen Darstellungen entweder nur die verschiedenen Betonalter oder die verschiedenen Betonzusammensetzungen, durch unterschiedliche Symbole zu kennzeichnen.

Angebracht wäre natürlich eine getrennte Darstellung für jede betrachtete Betontiefe. Darauf wird auf Grund des Versuchsumfangs verzichtet. Die zu erwartende große Streuung der Werte wird in Kauf genommen, ohne im Folgenden an ihr Zustandekommen und ihre Bedeutung zu erinnern. Statt dessen soll geklärt werden:

1. Welche Beziehungen bestehen zwischen Porosität und Dichtigkeit?
2. Reicht die alleinige Angabe der Porosität für eine befriedigende Beschreibung der Dichtigkeit aus?
3. Führt die Berücksichtigung des Verhältnisses Wasserkapazität zu füllbarer Porosität zu weitergehenden Erkenntnissen?

4.6.4.1.1 Porosität und Wasseraufnahmekoeffizient (Bilder 4.6.178 bis 4.6.182)

Die Bilder 4.6.178 bis 4.6.180 zeigen, daß keine eindeutige Beziehung zwischen der füllbaren Porosität bzw. der Gesamtporosität und dem Wasseraufnahmekoeffizient vorliegt. Dies gilt für alle untersuchten Altersstufen.

Dagegen ist eine Beziehung zwischen der Wasserkapazität und dem Wasseraufnahmekoeffizienten gegeben: Bis zu einer Wasserkapazität von ca. 10 Vol.-% ist die Größe des Wasseraufnahmekoeffizienten unabhängig von der Wasserkapazität und schwankt zwischen 0,3 und 0,6 kg/m²√h. Für größere Wasserkapazitäten nimmt der Wasseraufnahmekoeffizient überlinear mit der Wasserkapazität zu. Somit lassen sich allenfalls aus der Wasserkapazität Rückschlüsse auf die Dichtigkeit (hier ausgedrückt durch den Wasseraufnahmekoeffizienten)

ten) ziehen, aber nicht aus der füllbaren Porosität oder der Gesamtporosität. Dies gilt für die Werte aller Altersstufen.

In Bild 4.6.181 ist der Wasseraufnahmekoeffizient über dem Verhältnis Wasserkapazität zu füllbarer Porosität aufgetragen. Durch unterschiedliche Symbole sind die Werte für Proben mit $w/z = 0,5$ und $w/z > 0,5$ unterschieden. Mit wenigen Ausnahmen zeigt sich, daß bis zu einem Wert $\psi/\varepsilon_{f\ddot{u}ll} = 0,8$ der Wasseraufnahmekoeffizient unabhängig von diesem Verhältnis ist. Auch hier schwankt die zugehörige Größe des Wasseraufnahmekoeffizienten wiederum zwischen $0,3$ und $0,6 \text{ kg/m}^2/\sqrt{h}$. Dieses Verhalten zeigen fast nur Proben aus den Wänden mit einem w/z -Wert von $0,5$.

Für Werte $\psi/\varepsilon_{f\ddot{u}ll} > 0,8$ ist eine entgegengesetzte Abhängigkeit gegeben. Das Verhältnis Wasserkapazität zu füllbarer Porosität ist unabhängig vom Wasseraufnahmekoeffizienten und beträgt für alle Wasseraufnahmekoeffizienten im Mittel ca. $0,85$. Dies betrifft nur Proben aus Wänden mit einem w/z -Wert größer gleich $0,67$. Ohne weitere Untersuchungen können als Erklärung für dieses unterschiedliche Verhalten, wie bereits im Abschnitt 4.6.3, nur die w/z -Wert abhängigen Besonderheiten im Aufbau des Porensystems vermutet werden.

Diese Überlegungen führen auf die Darstellung von Bild 4.6.182, in dem der Zusammenhang zwischen Wasseraufnahmekoeffizient und dem Produkt des Verhältnisses Wasserkapazität zu füllbarer Porosität mit der Wasserkapazität dargestellt ist. Erwartungsgemäß ergibt sich auch hier eine "Unstetigkeitsstelle", die bei $0,08$ liegt. Unterhalb dieses Grenzwertes ist die Größe des Wasseraufnahmekoeffizienten konstant. Oberhalb ergibt sich in erster Näherung eine lineare Beziehung zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten und dem Produkt $\psi \cdot \psi/\varepsilon_{f\ddot{u}ll}$. Wiederum liegen fast alle Werte für Betone mit $w/z = 0,5$ unterhalb des Grenzwertes.

Die Bilder 4.6.181 und 4.6.182 zeigen somit nochmals, daß es keine von der Betonzusammensetzung unabhängige Beziehung zwischen der Porosität und dem Wasseraufnahmekoeffizienten gibt. Nur durch Heranziehung weiterer Kenngrößen über die Größe und die Form der Poren, sowie den geometrischen Aufbau des Porensystems, wären allgemeingültige Beziehungen denkbar. Auch die Hinzunahme des Verhältnisses $\psi/\varepsilon_{f\ddot{u}ll}$ führt nicht um diese Notwendigkeit herum.

4.6.4.1.2 Porosität und Wassereindringkoeffizient (Bilder 4.6.183 bis 4.6.187)

Die Bilder 4.6.183 - 4.6.185 zeigen, daß es keine lineare Beziehung (Bild 4.6.183) bzw. überhaupt eine Beziehung (Bilder 4.6.184 + 4.6.185) zwischen dem Wassereindringkoeffizienten und der Porosität gibt (vgl. Abschnitte 4.6.2 und 4.6.3). Offenbar besteht nur zwischen dem Wassereindringkoeffizienten und der Wasserkapazität ein, wenn auch bisher nicht erklärbarer, funktionaler Zusammenhang. Der Wassereindringkoeffizient weist bei einer Wasserkapazität von ca. 8 Vol.-% ein relatives Minimum auf. Dieses bleibt für alle Altersstufen erhalten.

Ein Minimum ergibt sich auch bei der Auftragung des Wassereindringkoeffizienten über dem Verhältnis von Wasserkapazität zu füllbarer Porosität (Bild 4.6.186). Dieses liegt bei ca. $\psi/\epsilon_{\text{füll}} = 0,8$. Werte links vom Minimum stammen aus den Wänden mit einem w/z-Wert von 0,5, Werte rechts vom Minimum aus Wänden mit einem w/z-Wert größer gleich 0,67. Für Werte rechts vom Minimum ergibt sich, unabhängig von der Größe des Wassereindringkoeffizienten, für das Verhältnis Wasserkapazität zu füllbarer Porosität ein mittlerer Wert von $\psi/\epsilon_{\text{füll}} = 0,85$ (vgl. Abschnitt 4.6.4.1.1).

Somit ist die Abhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten von der Wasserkapazität analog der Abhängigkeit vom Verhältnis Wasserkapazität zu füllbarer Porosität. Dieser Sachverhalt wird durch Bild 4.6.187 wiedergegeben: Der Wassereindringkoeffizient hat ein Minimum bei $\psi \cdot \psi/\epsilon_{\text{füll}} = 8,0 \cdot 0,8/100 \approx 0,065$. Dabei liegen wiederum fast alle Werte für einen w/z-Wert von 0,5 links vom Minimum, und entsprechend alle Werte für $w/z \geq 0,67$ rechts vom Minimum. Auch für den Wassereindringkoeffizienten ist die Beziehung auf die hier gewählten Kennwerte der Porosität nicht hinreichend zur Erklärung des Betonverhaltens. Diese Beziehung erweist sich als von der Betonzusammensetzung abhängig.

Somit gilt: Eine einfache lineare Beziehung zwischen Porosität und Dichtigkeit (hier die des kapillaren Wassertransportes) existiert nicht. Nur durch Hinzuziehung weiterer, die Porenstruktur beschreibender Kennwerte - deren Größe von der Betonzusammensetzung abhängig ist - ergibt sich die Möglich-

keit eindeutiger Beziehungen zwischen der Porosität und den Kennwerten der kapillaren Wasserleitung.

4.6.4.1.3 Wasserkapazität und CO_2 -Diffusionskoeffizient (Bild 4.6.188)

Im Bild 4.6.188 sind aufgetragen

- auf der Ordinate die Werte des CO_2 -Diffusionskoeffizienten für eine Probendicke von $9,0 \text{ mm} \leq d \leq 11,0 \text{ mm}$,
- auf der Abzisse die Werte der Wasserkapazität (stellvertretend für alle drei gemessenen Porositäten),

ermittelt an zwei verschiedenen Proben, jeweils gleicher Entnahmetiefe und gleichen Alters. Die Werte stammen aus allen acht Versuchswänden und den vier untersuchten Betonaltern (diese sind durch die unterschiedlichen Symbole gekennzeichnet).

Die sich abzeichnenden Abhängigkeiten bestätigen die bisherigen Feststellungen. Bis zu einer Wasserkapazität von 10 Vol.-% ist der CO_2 -Diffusionskoeffizient konstant und nimmt für größere Werte von ψ überlinear mit der Wasserkapazität zu. Dies gilt gleichermaßen für alle Altersstufen.

Da auch hier nicht geklärt werden kann, wieso eine Zunahme der Wasserkapazität von ca. 4 auf ca. 10 Vol.-% nicht mit einer signifikanten Veränderung des Diffusionskoeffizienten verbunden ist, ist die alleinige Angabe der Porosität nicht hinreichend zur Abschätzung der Diffusionsdichtigkeit.

4.6.4.2 Wasserkapazität und Porosität (Bilder 4.6.189 bis 4.6.191)

In dem Bild 4.6.189 ist die Wasserkapazität über der füllbaren Porosität aufgetragen. Dieses Bild bestätigt die aus der bisherigen Betrachtung des Verhältnisses Wasserkapazität zu füllbarer Porosität bekannten Zusammenhänge. Bis zu einer Wasserkapazität von 10 Vol.-% ist die Größe der zugehörigen füllbaren Porosität in erster Näherung konstant (ca. 10 - 13 Vol.-%). Für größere Wasserkapazitäten besteht ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Größen. Dies gilt wiederum für alle Altersstufen. Der Zusammenhang

zwischen Wasserkapazität und Gesamtporosität (siehe Bilder 4.6.190 - 4.6.191) ergibt analoge Abhängigkeiten. Wie Bild 4.6.190 zeigt, sind es wiederum die Werte der Wände mit einem w/z -Wert von 0,5, für die die lineare Beziehung nicht gilt.

Somit ist auch die Beziehung Wasserkapazität zu füllbarer bzw. Gesamtporosität eine Funktion, die von der Betonzusammensetzung abhängig ist. Da bis zu einer Wasserkapazität von 10 Vol.-% eine Veränderung der Wasserkapazität nicht zu einer Veränderung der Porosität führt, zeigt sich auch hier, daß eine aussagekräftige Beschreibung der Porositätseigenschaften durch alleinige Angabe der Größe der Porosität, ohne die Hinzuziehung weiterer Kennwerte, nicht möglich ist.

4.6.4.3 Diffusion und Kapillarleitung (Bilder 4.6.192 und 4.6.193)

In den Bildern 4.6.192 und 4.6.193 ist die Beziehung zwischen dem CO_2 -Diffusionskoeffizienten (nur Probendicke 9 - 11 mm) und dem Wasseraufnahmekoeffizienten bzw. dem Wassereindringkoeffizienten wiedergegeben. Die Prüfung erfolgte wiederum an jeweils eigenen Proben, entnommen aus den gleichen Wandbereichen. Dargestellt sind die Ergebnisse aller Wände und Betonalter.

Aus den Abbildungen läßt sich die Tendenz ablesen, daß eine Zunahme des Wasseraufnahmekoeffizienten und des Wassereindringkoeffizienten zu einer Zunahme des CO_2 -Diffusionskoeffizienten führt. Dies gilt für alle untersuchten Betonalter. Die Streuung der Werte ist groß (sowohl bei Betrachtung aller Altersstufen, wie auch innerhalb einer Altersstufe und trifft in stärkerem Maße auf den Wassereindringkoeffizienten als auf den Wasseraufnahmekoeffizienten zu). Eine formal gleiche Kausalität in der Beziehung Porosität (Wasserkapazität) zu Wasseraufnahmekoeffizient (Wassereindringkoeffizient) und Porosität (Wasserkapazität) zu CO_2 -Diffusionskoeffizient ist somit in erster Linie für diese Korrelation verantwortlich zu machen.

4.6.4.4 Zusammenfassung

1. Bis zu einem bestimmten Grenzwert der Porosität, der durch eine Wasserkapazität von 8 - 10 Vol.-% gekennzeichnet ist, verändert sich die Dichtigkeit des Betons nicht. Unterhalb dieses Grenzwertes führt eine

Verringerung der Porosität nicht zu einer Veränderung (Erhöhung) der Dichtigkeit; bzw. nicht in jedem Fall läßt sich eine Steigerung der Dichtigkeit durch eine Verringerung der Porosität erklären.

2. Dieser Grenzwert der Porosität ist von der Betonzusammensetzung (insbesondere dem w/z-Wert) abhängig. Für Betone mit einem w/z-Wert von 0,5 wird er auf jeden Fall unterschritten, während der w/z-Wert 0,67 auf Porositätsverhältnisse führt, die oberhalb dieses Grenzwertes liegen.
3. Kapillarleitung und Diffusion sind in formal analoger Weise von der Porosität abhängig, so daß zwischen beiden Transportarten eine empirische Korrelation besteht.

4.7 Ergebnisse der Bauwerksmessungen

4.7.1 Überblick

Die Ergebnisse der direkt an den Versuchswänden durchgeführten Versuche

- a) zum Wassereindringverhalten (Wassereindringprüfung)
- b) zum Absorptionsvermögen von Betonoberflächenzonen (ISAT)

begleitet von

- c) Messungen der Beton- und/oder Lufttemperaturen und
- d) Messungen zum Feuchtegehalt

mit dem im Abschnitt 4.4 angegebenen Umfang, werden im Folgenden dargestellt.

Wie bereits in Abschnitt 2 angekündigt, erfolgt die Zuordnung, des mit Hilfe der einbetonierten Elektroden gemessenen elektrischen Widerstands zu einem Feuchtegehalt, über Eichkurven, die an zusammen mit den Wänden betonierten Eichkörpern, ermittelt wurden.

Die Ergebnisse der Eichkörpermessungen und die daraus abgeleiteten Eichkurven werden getrennt für jede Wand in Abschnitt 4.7.2 wiedergegeben. Darauf

aufbauend erfolgt die Auswertung der Feuchtemessungen der Versuchswände. Auf die Ergebnisse der Temperaturmessungen wird dabei nicht weiter eingegangen (siehe dazu Abschnitt 4.7.3).

Im Abschnitt 4.7.3 wird der Einfluß untersucht, den die Temperatur und der Feuchtegehalt auf den ISA-Meßwert haben. Abschnitt 4.7.4 beschäftigt sich mit dem Einfluß weiterer Parameter (Betonzusammensetzung, Nachbehandlung, Alter, Lage der Prüfstelle (Dicke der Betondeckung)) auf den ISA-Wert.

Im Abschnitt 4.7.5 erfolgt die Wiedergabe der Ergebnisse der Wassereindringprüfungen. Im Abschnitt 4.7.6 wird die Korrelation zwischen Wassereindringprüfung und ISA-Messung erörtert.

Den Bezug zwischen dem ISA-Wert und dem in den Laborversuchen bestimmten Dichtigkeits- und Porositätseigenschaften wird im Abschnitt 4.7.7 nachgegangen.

In jedem der folgenden Abschnitte werden alle vorliegenden Ergebnisse der Absorptionsmessungen betrachtet. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, daß die Absorptionsmessungen auf immer neuen Prüfstellen der Betonoberfläche durchgeführt wurden. Die bei den Messungen beobachteten großen Streuungen gehen somit zum Teil auf die Inhomogenitäten des Betons der oberflächennahen Zone zurück.

Untersuchungen zur Streuung der Messungen an sich (Wiederholungen der Messungen an ein und derselben Meßstelle), sowie zum Einfluß unterschiedlicher Feuchtegehalte des Betons (Wiederholung der Messungen an ein und derselben Stelle nach verschiedenen Wettersituationen (die auf unterschiedliche Feuchtegehalte führen)) wurden nicht durchgeführt.

4.7.2 Ergebnisse der Feuchtemessungen

4.7.2.1 Ergebnisse der Messungen an den Eichkörpern (Bilder 4.7.1 bis 4.7.16)

Die zusammen mit den Wänden hergestellten Eichkörper (siehe Bild 4.7.17) lagerten bis zum Betonalter von ca. 180 Tagen im Versuchskeller, wurden dann durch Lagerung unter Wasser wassergesättigt und anschließend bei 40 °C

getrocknet. Zu den Meßzeitpunkten (zwei- bis dreimal in der Woche) wurde die Trocknung kurz unterbrochen. Die Eichkörper wurden dem Trockenschrank entnommen und gewogen. Über die einbetonierten Elektroden wurde der elektrische Widerstand gemessen. Diese Ergebnisse gelten für eine Betontemperatur von 40 °C, da die Messungen unmittelbar nach Entnahme der Eichkörper aus dem Trockenschrank erfolgten. Eine zweite Messung bei 20 °C schloß sich an. Diese wurde nach mindestens zweistündiger Lagerung der Eichkörper in der Laborluft, von ca. 20 °C, durchgeführt.

Pro Wand wurden zwei Eichkörper untersucht, die jeweils ein Stab- und ein Drahtelektrodenpaar enthielten. Die Messungen erstreckten sich auf einen Zeitraum von 3 bis 4 Wochen. Am Ende dieses Zeitraums war zwar keine Gewichtskonstanz erreicht, aber die erzielten Trocknungsgrade sind größer, als diejenigen die im mitteleuropäischen Klima erreichbar sind. Zur Bestimmung des Trockengewichts wurden die Eichkörper abschließend bei 105 °C getrocknet.

Die Meßtiefe der Elektroden - der Bereich auf dem die Isolierung entfernt worden war - liegt für die Stabelektroden in einer Tiefe von 8 - 23 mm, für die Drahtelektroden in einer Tiefe von ca. 20 mm. Somit kann in erster Näherung davon ausgegangen werden, daß die Meßtiefe und die Lage des mittleren Feuchtegehaltes (nur der ist durch Wiegung der gesamten Platte ermittelbar) übereinstimmen. Genauere Messungen oder theoretische Überlegungen zum Feuchteprofil wurden nicht durchgeführt. Ebenso wurden keine Versuche durchgeführt, bei denen der Feuchtegehalt durch Befeuchtung vom trockenen Zustand ausgehend, kontinuierlich gesteigert wurde. Wie Versuchsergebnisse zeigen /14/, ergeben sich für diese beiden Versuchsdurchführungen unterschiedliche Abhängigkeiten zwischen Feuchtegehalt und elektrischen Widerstand.

Die Messung des elektrischen Widerstands erfolgte mit dem Feuchtemeßgerät "Aqua Boy EFM I" der Fa. K.P. Mündinger GmbH. Dieses Gerät arbeitet mit Wechselstrom. Die Ablesung erfolgt über eine "neutrale Meßwertskala" die in 100 Skalenteile eingeteilt ist. Diese Skala ist so aufgebaut, daß mit wachsender Feuchte höhere Skalenwerte abgelesen werden.

In den Bildern 4.7.1 bis 4.7.16 sind die Ergebnisse der Eichkörperversuche wiedergegeben. Wie erwartet, sind die Eichkurven sowohl von der Anordnung

und Geometrie der Elektroden, als auch von der Betontemperatur abhängig. Der Zusammenhang zwischen abgelesenem Skalenwert und Betonfeuchte ist nicht linear.

Für die beiden Eichkörper zugehörig den Wänden I, VII und VIII ergeben sich keine reproduzierbaren Ergebnisse; für gleiche Skalenablesungen ergeben sich Feuchteunterschiede zwischen den Eichkörpern von mehr als 1 Gew.-%. Für die übrigen Wände sind dagegen nur Feuchteunterschiede von maximal 0,4 Gew.-% vorhanden, so daß eine Mittelwertbildung aus beiden Eichkurven für die weitere Auswertung sinnvoll ist. Für jede der beiden Elektrodenanordnungen läßt sich aus den Kurven für 20 °C und 40 °C eine Temperaturkorrektur berechnen, so daß Messungen durchgeführt zu beliebigen Temperaturen ausgewertet werden können. Auf Einzelheiten dieses Teils der Versuchsauswertung wird hier nicht eingegangen. Bei der Auswertung der Wandmessungen ist der Temperatureinfluß berücksichtigt.

4.7.2.2 Ergebnisse der Messungen an den Versuchswänden (Bilder 4.7.18 bis 4.7.22)

Aus dem zuvor genannten Grund, sind in den Bildern 4.7.18 bis 4.7.22 nur die Ergebnisse für die Wände II bis VI angegeben. Dabei wurden nur die Messungen mittels Drahtelektroden ausgewertet, da mit ihnen besser die Tiefenabhängigkeit der Feuchte erfaßt wird (Elektrodenanordnung parallel zur Oberfläche). Dargestellt sind nur die Ergebnisse für die Meßstellen mit einem Abstand von 5 mm zur jeweiligen Betonoberfläche. Nur diese Meßtiefe kann in der Regel als repräsentativ für den Prüfbereich der Absorptionsmessungen angesehen werden. Pro Wandtiefe ist nur eine Meßstelle vorhanden. Damit ergeben sich auch für die Wände, die bei den Eichkörpern aufgetretenen Schwierigkeiten, nämlich, daß mit nur einer Meßstelle nicht unmittelbar ein für den Beton repräsentatives Ergebnis ermittelt werden kann. Die Versuchsergebnisse bestätigen diese Vermutung.

Für Wand III, V und VI, teilweise auch Wand IV, ergeben sich für ein Betonalter von ca. 300 Tagen, Feuchtegehalte von ca. 2,5 Gew.-%. Für alle Wände schwanken die ermittelten Feuchtegehalte zwischen 2 und 3,5 Gew.-% (ab einem Alter von 90 Tagen). Auf Grund von Sorptionsisothermen /24/, entspricht dies (bei Annahme von Gleichgewichtsfeuchten) einer zugehörigen relativen

Luftfeuchte von ca. 35 % bis 85 %. Auch unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die Messungen nur in Perioden von mindestens 36 Stunden Abstand zum letzten Regenfall, also in Trockenperioden, durchgeführt wurden, erscheint ein Großteil der ermittelten Feuchten als zu gering. Wie Tab. 4.7.1 zeigt, liegen zwar die zum Meßzeitpunkt herrschenden Luftfeuchten in den oben angegebenen Bereich, größtenteils sogar über 50 %, aber die Betonfeuchten haben größtenteils nur einen Wert von unter 2,6 Gew.-% (dies wäre in etwa die zu erwartende Gleichgewichtsfeuchte zu 50 % relativer Luftfeuchte).

Auf dem hier beschriebenen Weg ist eine Feuchtebestimmung nicht zuverlässig möglich. Auf eine weitere Diskussion der Bilder 4.7.18 bis 4.7.22 wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Neben den Zweifeln an der grundsätzlichen Einsetzbarkeit dieses Meßverfahrens (siehe Abschnitt 2), ist vor allem die statistisch nicht abgesicherte Meßstellenanzahl für dieses Ergebnis verantwortlich. Dies machen insbesondere die Ergebnisse von Wand IV und Wand VI deutlich. Für die beiden verschiedenen Wandseiten liegen die ermittelten Feuchten zum Teil um mehr als 1 Gew.-% auseinander.

4.7.3 Witterungseinflüsse auf den ISA-Meßwert

4.7.3.1 Allgemeine Beschreibung der Einflüsse

Unabhängig vom untersuchten Baustoff werden die Vorgänge der kapillaren Wasserleitung durch die

- Temperatur
- und den Feuchtegehalt

des zu prüfenden Bauteils beeinflußt. Die Temperaturabhängigkeit ergibt sich aus der Temperaturabhängigkeit der transportbestimmenden Wassereigenschaften Oberflächenspannung und dynamische Viskosität. Auf die Feuchteabhängigkeit der Meßwerte wurde bereits in Abschnitt 3 dieses Berichts eingegangen.

4.7.3.2 Temperaturabhängigkeit der ISA-Messungen (Bilder 4.7.23 bis 4.7.30)

Aus den vorliegenden Meßergebnissen kann eine Temperaturabhängigkeit des ISA-Wertes, im baupraktisch relevanten Temperaturbereich von 0 - 30 °C, nicht nachgewiesen werden. Dies liegt daran, daß Werte unterschiedlicher Feuchte und unterschiedlichen Alters über der Temperatur aufgetragen sind. Auf eine nach diesen drei Einflußgrößen getrennte Auswertung wird hier verzichtet.

4.7.3.3 Feuchteabhängigkeit der ISA-Messungen

Da eine zuverlässige Bestimmung des Feuchtegehalts nicht gegeben ist, wird auf die Darstellung der Feuchteabhängigkeit der ISA-Meßwerte, auf Grundlage der vorliegenden Versuchsergebnisse, verzichtet. Auf Grund der Ergebnisse von Abschnitt 3, ist für die vorhandenen Feuchtegehalte der oberflächennahen Betonzone von 2 bis 3,5 Gew.-%, eine ähnliche Feuchteabhängigkeit auch für die Versuchswände zu erwarten. Die vorliegenden Versuchsergebnisse bestätigen dies nicht. Sie vermitteln den Eindruck eines pro Wand konstanten ISA-Werts. Dies könnte darauf hindeuten, daß die Feuchteschwankungen in oberflächennahen Betonzonen 36 Stunden nach dem letzten Regenfall, relativ gering sind.

Andererseits liegen die Feuchtegehalte auf jeden Fall unter 3,5 Gew.-%. Nur für solche Verhältnisse, sind Betone unterschiedlicher Zusammensetzung hinsichtlich ihres Absorptionsverhaltens unterscheidbar (vgl. die Ergebnisse von Abschnitt 3).

4.7.4 Einfluß betontechnologischer Parameter auf den ISA-Wert

4.7.4.1 Untersuchte Parameter

In diesen Abschnitt wird den Einflüssen nachgegangen, die die folgenden Parameter, auf das Meßergebnis haben:

- Betonzusammensetzung
- Nachbehandlung

- Betonalter
- und Dicke der Betondeckung bzw. Wandseite auf der die Messung stattfand.

Die Diskussion der Ergebnisse folgt, soweit dies sinnvoll ist, dem Vorgehen bei der Behandlung der Ergebnisse der Laborversuche. Dort aufgeworfene Fragestellungen liegen auch den folgenden Ausführungen zugrunde, ohne daß sie hier erneut formuliert werden (siehe Abschnitt 4.6).

Auf die Einflüsse, die sich aus dnm unterschiedlichen Herstellungsterminen der Wände ergeben (ein für alle Wände gleiches Betonalter fällt in unterschiedliche Jahreszeiten), wird nicht weiter eingegangen.

4.7.4.2 Einfluß der Betonzusammensetzung (Bilder 4.7.31 bis 4.7.34)

Der Einfluß der Betonzusammensetzung auf den ISA-Wert führt bei einer Verdoppelung des w/z-Wertes von 0,5 auf 0,98 zu einer Verzehnfachung des ISA-Wertes von ca. 0,03 auf Werte größer 0,3 ml/m².s. Dies gilt in gleicher Weise für beide Wandseiten.

4.7.4.3 Einfluß der Nachbehandlung (Bilder 4.7.31 bis 4.7.34)

Die Unterschiede in den ISA-Werten sind für die nachbehandelten Wände geringer als für nicht nachbehandelte Wände. Dieser Nachbehandlungseinfluß läßt sich für beide Wandseiten gleichermaßen nachweisen. Insbesondere gilt dies für die Wände mit einem w/z-Wert von w/z = 0,85. Dort führt die Nachbehandlung auf halb so große ISA-Werte. Die Ausführung einer Nachbehandlung bewirkt außerdem eine "Vergleichmäßigung" des Betons, so daß sich die Streuung der Meßwerte verkleinert.

Wie schon bei den Laborversuchen zur Dichtigkeit und Porosität gleichen sich mit zunehmendem Alter die Werte nachbehandelter und nicht nachbehandelter Wände aneinander an. Dies ist nicht immer unmittelbar aus den dargestellten Versuchsergebnissen ersichtlich, da sich diesem Phänomen die Einflüsse aus Temperatur und Feuchte überlagern.

ISA-Messungen sind somit nicht unmittelbar geeignet, die Güte verschiedener Nachbehandlungen zu unterscheiden. Unmittelbar nach dem Ausschalen gewonnene Meßwerte werden durch den herstellungsbedingten Überschußwassergehalt bestimmt. Messungen zu einem späteren Zeitpunkt, zu dem das Überschußwasser größtenteils verdunstet ist, zeigen bei witterungsbeanspruchten Bauteilen eine Angleichung der Verhältnisse von nicht nachbehandelten Wänden an diejenigen nachbehandelter Wände. Dies ist durch Nachhydratationen während feuchter Jahreszeiten bedingt.

Den die Aussage verfälschenden Einfluß des Überschußwassers bei Messungen unmittelbar nach dem Ausschalen kann man durch Vortrocknung der Meßfläche eliminieren. Der dann gewonnene Meßwert charakterisiert jedoch eine Betonqualität, die für die Dauerhaftigkeit des Betons eine geringe Aussagekraft hat. Die Dichtigkeit des Betons setzt sich aus den beiden Anteilen Betonqualität und Wechselwirkung Witterung-Beton, ausgedrückt durch den Feuchtegehalt, zusammen. Durch Vortrocknung erzielte Feuchtegehalte sind aber nur eingeschränkt, mit den durch natürliche Witterung entstandenen Feuchtegehalten, vergleichbar.

4.7.4.4 Einfluß des Betonalters (Bilder 4.7.35 bis 4.7.42)

Nicht für alle Wände im gleichen Maße zeigt sich eine Abnahme des ISA-Wertes mit zunehmendem Betonalter. Diese ist für nachbehandelte Wände weniger deutlich, als für nicht nachbehandelte Wände. Diese Aussage gilt gleichermaßen für beide Wandoberflächen. Messungen zu einem späteren Betonalter als ca. 90 Tage lassen ein unterschiedliches Zeitverhalten nicht mehr erkennen. Die zum Teil beobachteten großen Streuungen, bedingt durch

- die Inhomogenitäten des Betons (jede Messung wurde auf einer anderen Stelle der Betonoberfläche durchgeführt)
- den Feuchte- und Temperatureinfluß

erschweren die Angabe und das Erkennen eindeutiger Tendenzen. Offensichtlich überwiegen aber die Einflüsse der Dichtigkeitszunahme infolge Nachhydratation und Karbonatisierung, gegenüber jenen des Dichtigkeitsverlustes infolge Austrocknung und weiterer Witterungsbeanspruchungen. Nach ca. 400 Tagen Beobachtungszeit kann festgestellt werden, daß eine Verringerung der

Dauerhaftigkeit sich nicht durch einen Abbau der Dichtigkeit des Betons ankündigt (Dies könnte natürlich auch durch den bis zu diesem Zeitpunkt nur sehr geringen Abbau der Dauerhaftigkeit bedingt sein).

4.7.4.5 Dicke der Betondeckung (Bilder 4.7.43 bis 4.7.50)

Auch an Hand der ISA-Messungen werden die unterschiedlich dicken Betondeckungen miteinander verglichen, um festzustellen, ob die Dicke der Betondeckung einen Einfluß auf die entstandene Betonqualität hat (Klärung der Frage, ob neben der u.U. zu geringen Dicke der Betondeckung, eine durch diese geringe Dicke bedingte ungenügende Dichtigkeit entsteht).

Wie die Bilder 4.7.43 bis 4.7.50 zeigen, gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschieden dicken Betondeckungen, bzw. zwischen den beiden Wandseiten. Die zeitliche Entwicklung der Meßwerte, im Sinne einer Zunahme der Dichtigkeit mit zunehmendem Alter, ist nur bei Trennung der Meßwerte der Messungen die im Alter < 90 Tage, von denen die im Alter > 90 Tage durchgeführt wurden, vorhanden und nachweisbar (vgl. die vorherige Aussage zur Streuung der Meßwerte und deren vermutete Ursachen). Die Dicke der Betondeckung hat offenbar keinen Einfluß auf die Größe der Streuung der Werte.

4.7.5 Ergebnisse der Wassereindringprüfung (Bilder 4.7.51 bis 4.7.58)

Wassereindringprüfungen, analog der Wassereindringprüfung nach Karstens, werden nur begleitend zu den ISA-Messungen durchgeführt. Daraus erklärt sich der gegenüber den ISA-Messungen halbierte Versuchsumfang. Dieser reicht aus, um den bereits in Abschnitt 3 abgeleiteten physikalischen Zusammenhang zwischen ISA-Messung und Wassereindringprüfung zu bestätigen.

Auf Grund dieses theoretischen Zusammenhanges wird darauf verzichtet, auch für die Ergebnisse der Wassereindringprüfungen den Temperatur- und Feuchteeinfluß darzustellen.

Für jede Wand getrennt, werden die Versuchsergebnisse in Abhängigkeit des Betonalters zum Meßzeitpunkt aufgetragen. Dies kann nicht die zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung deut-

lich werden lassen, denn für jede Wand erstrecken sich die Messungen nur auf einen eng begrenzten Zeitraum von 2 bis 3 Monaten. Somit liegen nicht zu allen Altersstufen Meßergebnisse vor.

Wiedergegeben sind die Auswertungen der Messungen zu den Ablesezeitpunkten 10 und 30 Minuten nach Versuchsbeginn. (Auswertung siehe Abschnitt 3).

Betrachtet werden zunächst die Ergebnisse der unbewehrten Wandseite. Dabei fällt auf, daß zwischen den Meßwerten der beiden Ablesezeitpunkte kaum Unterschiede bestehen (gilt für alle Wände). Die vereinfachende Annahme, daß bis zum Zeitpunkt $t = 10$ min. der Transportvorgang überwiegend eindimensional erfolgt, erweist sich somit als gerechtfertigt.

Der Einfluß der Betonzusammensetzung macht sich folgendermaßen bemerkbar:

- Wände mit $w/z = 0,5$ und $0,67$ ergeben Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung von weniger als $0,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$.
- für die Wände mit einem w/z -Wert von $0,85$ liegt er zwischen $0,5$ und $1,0 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$.
- für die Wände des w/z -Wertes $0,98$ ergeben sich im Mittel Werte zwischen $1,5$ und $2,0 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$.

Die Streubreite der Werte nimmt mit wachsendem w/z -Wert zu. Das Prüfalter ist in der Regel so groß, daß der Nachbehandlungseinfluß abgeklungen und nicht mehr nachweisbar ist.

4.7.6 Korrelation der Ergebnisse der ISA-Messungen mit denen der Wassereindringprüfung (Bilder 4.7.59 und 4.7.60)

Bild 4.7.59 zeigt die Korrelation der Ergebnisse der beiden durchgeführten Arten der Absorptionsmessung. Verglichen werden die Meßwerte mit der für getrocknete Proben und eindimensionalen Transport abgeleiteten physikalischen Beziehung zwischen den beiden Meßverfahren.

Bis zu einem ISA-Wert von ca. $0,4 \text{ ml/m}^2\cdot\text{s}$ (entspricht einem Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung von ca. $1,2 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$) bestätigen die

Versuchsergebnisse die theoretische Beziehung, wenn auch mit einer erheblichen Streuung.

Gegeneinander aufgetragen sind Messungen nach beiden Verfahren die auf derselben Betondeckung zu einem ungefähr gleichen Alter erfolgten (mindestens 90 Tage). Beide Messungen fanden nicht an einem Tag statt. Es ergaben sich zwischen den Meßzeitpunkten Zeitdifferenzen von bis zu 3 Wochen. Dies bedeutet, daß den beiden Messungen unterschiedliche Wettersituationen zugrundeliegen. Daraus erklärt sich ein Teil der großen Streuung.

Ab einem Wasseraufnahmekoeffizienten $1,2 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$ ist der ISA-Wert, die Wassereindringgeschwindigkeit, konstant, obwohl der Wasseraufnahmekoeffizient noch weiter zunimmt. Ein ähnliches Verhalten ist auch aus Bild 4.7.60 zu sehen. Es zeigt die Auftragung des Wasseraufnahmekoeffizienten gemessen in Laborversuchen (Absizse) und in der Wassereindringprüfung (Ordinate). Für die Auswahl der aufgetragenen Meßwerte gelten die zuvor beschriebenen Kriterien. Auch hierbei besteht für die Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung die größer als $1,2 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$ sind, keine Korrelation mehr mit den Wasseraufnahmekoeffizienten gemessen in Laborversuchen. Eine Erklärung für dieses Verhalten konnte nicht gefunden werden.

4.7.7 Vergleich der Ergebnisse der Laborversuche mit denen der Bauteilversuche (Bilder 4.7.60 bis 4.7.66)

Bereits für die in Laborversuchen bestimmten Eigenschaften der Kapillarleitung wurde untersucht, welche Beziehungen zur Porosität, sowie zu den Diffusionseigenschaften bestehen. Dies wird auch für den ISA-Wert überprüft. Da die Betonalter der Proben der Laborversuche, nicht mit den Zeitpunkten der Bauteilmessungen übereinstimmen, werden wiederum nur Meßwerte vergleichbaren Alters zusammengefaßt. Da bis zu zehn ISA-Messungen zu zehn verschiedenen Zeitpunkten, aber nur zu vier Zeitpunkten Laborprüfungen, stattfanden, werden z.T. den Ergebnissen einer Laborprüfung mehrere ungefähr zeitgleich gemessene ISA-Werte zugeordnet. Der Temperatureinfluß auf die Absorptionsversuche wird nicht berücksichtigt. Stellvertretend für beide Absorptionsmeßverfahren werden nur die ISA-Werte betrachtet.

Um auch hierbei den begrenzten Einfluß der Nachbehandlung bei freibewitterten Versuchskörpern (reale Bauwerke) aufzeigen zu können, werden in den

Bildern die beiden Nachbehandlungsarten durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet. Es werden alle Meßwerte aufgenommen für die vergleichbare Randbedingungen (Dicke der Betondeckung, Wandseite, Betonzusammensetzung, Alter, Nachbehandlung) vorliegen.

Vorrangig zu beachten ist auch hier der Feuchteeinfluß. Miteinander verglichen werden Ergebnisse von getrockneten Proben (Laborversuche) mit Ergebnissen von Messungen auf der feuchten Betonoberfläche.

Die Bilder 4.7.60 und 4.7.61 zeigen die Beziehungen der Ergebnisse beider Absorptionsmeßverfahren zum Wasseraufnahmekoeffizienten gemessen in Laborversuchen. In beiden Darstellungen läßt sich der Feuchteeinfluß daran ablesen, daß die theoretischen Beziehungen von den Meßwerten der Bauteilversuche unterschritten werden. Sie weisen somit gegenüber den getrockneten Proben der Laborversuche eine höhere Dichtigkeit auf. Diese ist nicht dem Einfluß einer anderen Betonqualität, sondern dem der Feuchte zuzuschreiben.

Nahezu alle Meßwerte liegen in einem Streuband, das sich dann ergibt, wenn man die theoretischen Beziehungen um $\Delta A = 0,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{h}$ parallel nach rechts verschiebt. Dies ist für die vorliegenden Verhältnisse (deren Versuchszeitpunkte dadurch gekennzeichnet sind, mindestens 36 Stunden nach dem letzten Regenfall durchgeführt worden zu sein) der Maximalwert des Dichtigkeitszuwachses infolge der Witterungseinflüsse auf den Beton im Raum Braunschweig. Auch hierbei ist der Einfluß der Nachbehandlung nicht ablesbar. Die Abhängigkeiten zwischen den Absorptionsversuchen und den Wasseraufnahmekoeffizienten gelten gleichermaßen für nachbehandelte und nicht nachbehandelte Wände.

Bild 4.7.62 zeigt die Beziehung zwischen dem ISA-Wert und dem Wassereindringkoeffizienten. Unter Beachtung der großen Streuung ist eine Zunahme des Wassereindringkoeffizienten mit einer Zunahme des ISA-Wertes verbunden. Da der Wassereindringkoeffizient eine aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten und der Wasserkapazität abgeleitete Größe ist, wird nicht weiter auf Bild 4.7.62 eingegangen.

Die Abhängigkeit des ISA-Wertes von der Wasserkapazität (Bild 4.7.63), der füllbaren Porosität (Bild 4.7.64) und der Gesamtporosität (Bild 4.7.65) ergibt die bereits in Abschnitt 4.6.4.1.1 festgestellten Beziehungen. Zwi-

schen der füllbaren Porosität bzw. der Gesamtporosität und dem ISA-Wert besteht keine Beziehung.

Bis zu einer Wasserkapazität von ca. 10 Vol.-% ist der ISA-Wert nahezu konstant ($0,02 - 0,08 \text{ ml/m}^2 \cdot \text{s}$). Für größere Wasserkapazitäten ist er unabhängig von der Wasserkapazität. Auch dieses Verhalten gilt unabhängig von der Nachbehandlungsart. Weitere Untersuchungen werden an dieser Stelle nicht durchgeführt, da zu erwarten ist, daß sie sich analog zu den Abhängigkeiten des Wasseraufnahmekoeffizienten von der Wasserkapazität ergeben werden (siehe Abschnitt 4.6.4.1.1).

Bild 4.7.66 zeigt die Beziehung zwischen dem CO_2 -Diffusionskoeffizienten und dem ISA-Wert. Auch hierbei existiert ein unterer Grenzwert des CO_2 -Diffusionskoeffizienten von ca. $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$, bis zu dem die ISA-Werte ungefähr konstant sind. Für größere CO_2 -Diffusionskoeffizienten ergibt sich eine annähernd lineare Beziehung zwischen den ISA-Werten und den Logarithmus des Diffusionskoeffizienten (gültig für die Wände ab einem w/z-Wert größer gleich 0,85). Da auch hier Ergebnisse gemessen an getrockneten Laborproben, mit Meßergebnissen feuchter Betonoberflächen verglichen werden, wird auf weitere Erklärungen verzichtet.

Zusammenfassung:

Auch für die Abhängigkeit des ISA-Wertes von der Porosität und Dichtigkeit (gemessen nach verschiedenen Versuchstechniken, für die Transportarten Kapillarleitung und Diffusion) gelten die in Abschnitt 4.6.4.4 ermittelten Zusammenhänge.

5. BEURTEILUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

1. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens näher untersuchte Dauerhaftigkeit, beruht auf der Alkalität der Porenflüssigkeit des Betons in der unmittelbaren Umgebung der Oberfläche der Bewehrungsstäbe.

Die Diffusion von CO_2 in den Beton der Betondeckung und die sich daran anschließende Karbonatisierung bauen die Alkalität der Porenflüssigkeit, und damit die Dauerhaftigkeit, ab. Nur bei Kenntnis der Diffusionseigenschaften des Betons der Betondeckung kann die Abbaurate der Dauerhaftigkeit abgeschätzt werden. Dazu ist z.B. die Kenntnis der hier gemessenen Dichtigkeits- und Porositätseigenschaften erforderlich.

Bei derartigen Dichtigkeitsmessungen ist der Feuchtegehalt des Betons zu berücksichtigen, da er sowohl bei den Absorptions- als auch den CO_2 -Diffusionskoeffizienten zu einer Dichtigkeitszunahme führt. Diese ist ab einem Feuchtegehalt von schätzungsweise 1,5 - 2,0 Gew.-% nachweisbar und führt bei einem Feuchtegehalt über ca. 4,0 Gew.-% auf einen praktisch undurchlässigen Beton. (Diese Aussage gilt natürlich nicht für den Vorgang der Wasserdampfdiffusion.)

2. Der Zusammenhang zwischen Porosität und Dichtigkeit wurde eingehend untersucht. Dabei zeigte sich, daß neben der Größe der Porosität weitere Porositätseigenschaften (wie z.B. Form der Poren, Größe der Poren, Häufigkeitsverteilung der Poren, geometrischer Aufbau des Porensystems) bekannt sein müssen, um die Beziehung zwischen Porosität und Dichtigkeit allgemeingültig beschreiben zu können.

Nur zwischen jenem Teil der Porosität der von der Wasserkapazität beschrieben wird, und den gemessenen Dichtigkeitseigenschaften, läßt sich ein funktionaler Zusammenhang erkennen. Dieser Zusammenhang ist von der Betonzusammensetzung, insbesondere dem w/z-Wert, abhängig.

3. Da nur die Diffusionseigenschaften unmittelbar für die Dauerhaftigkeit entscheidend sind, stehen die empirischen und theoretischen Beziehungen zwischen den Kennwerten der verschiedenen gemessenen Dichtigkeiten im Mittelpunkt des Interesses. Die Existenz solcher Beziehungen ist notwendig, um von den zerstörungsfrei, direkt am Bauteil gemessenen Absorptionseigen-

schaften (ISA-Wert, Wasseraufnahmekoeffizient der Wassereindringprüfung) auf das Karbonatisierungsverhalten schließen zu können. Erste Grundlagen eines dazu erforderlichen Vorhersagemodells konnten vom Antragsteller bereits erarbeitet werden /1-5/. Die hier ermittelten Beziehungen bestätigen die Modellannahmen.

4. Bereits in Abschnitt 1 wurde das Kriterium zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit angegeben. Der Umfang der Karbonatisierung ist auf die Bauteiltiefe zu begrenzen, die kleiner als die Betondeckung ist (unter Beachtung der Streuung beider Größen). Mittels dieses Kriteriums kann durch die Messung von physikalischen Baustoffeigenschaften (Dichtigkeit und Porosität) eine Prognose der Dauerhaftigkeit vorgenommen werden.

5. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zeigen, daß zur Abschätzung der Dauerhaftigkeit, nicht alle hier gemessenen Eigenschaften gleich gut geeignet sind. Signifikante Aussagen zur Dauerhaftigkeit eines Betons, der im Rahmen eines Stahlbetonbauteils eingesetzt werden soll, auf Grundlage seiner Eigenschaften

- Wassereindringkoeffizient
- füllbare Porosität
- Gesamtporosität

sind nur eingeschränkt möglich.

Dagegen ist mit den Eigenschaften

- Wasserkapazität
- Verhältnis Wasserkapazität zu füllbarer Porosität
- Wasseraufnahmekoeffizient
- ISA_{10} -Wert
- A_{w10} -Wert

eine zuverlässige Beurteilung der Dauerhaftigkeit gegeben. Dies zeigte sich am augenfälligsten bei der Betrachtung des Zusammenhangs der Wasserkapazi-

tät zu den verschiedenen Dichtigkeitskennwerten. Es gibt einen Grenzwert der Wasserkapazität von ca. 8 - 10 Vol.-%, bei dessen Unterschreitung jeder der oben aufgeführten Dichtigkeitskennwerte einen konstanten und minimalen Wert annimmt. Naheliegend ist deshalb die Vermutung, daß mittels dieses Grenzwertes ein Beton guter Qualität, von einem Beton schlechterer Qualität unterschieden werden kann. (siehe Bild 5.1)

Inwieweit die in Bild 5.1 angegebenen Grenzwerte, auch solche sind, die einen dauerhaften Beton von einem nicht dauerhaften unterscheiden, konnte nicht geklärt werden. Mit den hier gewählten Betonzusammensetzungen ist es auch nicht möglich, den Zusammenhang herzustellen, mit dem geklärt werden könnte, welche Betonzusammensetzungen und Nachbehandlungen kombiniert werden müssen, um mit einer der Aufgabenstellung "Qualitätsbeurteilung von Beton" angemessenen Aussagesicherheit, einen Beton herzustellen, dessen Eigenschaften in den Bereich "guter Qualität" fallen.

6. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit sind in Bild 5.2 die mittleren Karbonatisierungstiefen zu den Betonaltern 180 und 360 Tage, über dem zum gleichen Alter gemessenen ISA_{10} -Werten aufgetragen. Mit zunehmenden ISA_{10} -Wert (gemessen zu Zeitpunkten nach einer regenfreien Periode von mindestens 36 Stunden) nimmt auch die Karbonatisierungstiefe zu. Der Zusammenhang zwischen der Karbonatisierungstiefe und dem ISA_{10} -Wert ist zeitabhängig. Auf eine Trennung der Ergebnisse nach den Himmelsrichtungen nach denen die Wandseiten orientiert sind, wurde auf Grund des geringen Betonalters verzichtet.

Abschließend zeigt sich, daß Absorptionsmessungen geeignet sind, die Dauerhaftigkeit von Beton zu beurteilen. Die Dichtigkeit der Betonoberfläche ist für die Dauerhaftigkeit maßgebend.

6. LITERATUR

- / 1/ Rostásy,F.S.; Bunte,D.: Evaluation of On-site Conditions and Durability of Concrete Panels Exposed to Weather. IABSE-Symposium Durability of Structures, Lisbon 6.9.-8.9.1989, Band 1, S. 145-149.
- / 2/ Bunte,D.: Zur Dauerhaftigkeit von Beton gegenüber Witterungsbeanspruchungen. Heft 87 der Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 1989, S. 41-46.
- / 3/ Bunte,D.; Rostásy,F.S.: Test Methods for On-site Assessment of Durability. IABSE-Symposium Durability of Structures, Lisbon 6.9.-8.9.1989, Band 1, S. 335-340.
- / 4/ Paulmann,K.; Bunte,D.: Permeationsmessungen zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Betonoberflächen. Heft 87 der Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 1989, S. 89-92.
- / 5/ Rostásy,F.S.; Bunte, D.: Assessment of Durability of Concrete Surfaces. Durability of Non-Metalic Inorganic Building Materials. DFG-Abschlußkolloquium, Karlsruhe, 4.10-5.10.1988.
- / 6/ Lück,W.: Feuchtigkeit. R. Oldenbourg, München, Wien, 1964.
- / 7/ Girlich,N.: Ein Beitrag zum kapillaren Flüssigkeitstransport in Baustoffen. Dissertation, Weimar, 1982.
- / 8/ Altmann,K.: Das Verhalten des Betons bei Einwirkung von Feuchtigkeit. Dissertation, Berlin, 1968.
- / 9/ Andreae,G.: Zur Feuchtemessung in Beton. In: Heft 293 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1978.

- /10/ Nielsen,A.; Bertelsen,N.; Nilsson,L.O.: Methoden zur Bestimmung des Feuchtegehaltes in Baustoffen und Bauwerken. Bautenschutz und Bausanierung, Sonderheft, 1983, S. 30-35.
- /11/ Hundt,J.; Buschmann,J.: Moisture Measurement in Concrete. Materials and Structures, Vol. 4, Nr. 22, 1971, S. 253-259.
- /12/ Altmann,K.: Neues Feuchtemessverfahren für Bauteile. Die Bautechnik, 8/1970, S. 268-272.
- /13/ Andreae,G.: Zur Feuchtemessung in Beton. Materialprüfung, Nr. 3, 1973, S. 95-97.
- /14/ Höcker,J.; Pläßmann,J.: Ermittlung des Feuchtegehaltes im Straßenbeton durch elektrische Widerstandsmessungen. Forschungsbericht, Heft 122 der Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1971.
- /15/ Cammerer,W.F.: Messung des Feuchtegehaltes durch elektrische Verfahren. Allgemeine Wärmetechnik, Heft 10, 1956, S. 219-225.
- /16/ Diem,P.: Die Bestimmung der kapillaren Saugfähigkeit von sehr dichten Beton. Betonwerk und Fertigteiltechnik, Heft 11, 1986, S. 719-724.
- /17/ Karstens,R.: Bauchemie für Studium und Praxis. Heidelberg, 1976.
- /18/ Norm BS 1881, pt. 5, 1970: Methods of testing hardened concrete for other than strength.
- /19/ Dhir,R.K.; Hewlett,P.C.; Chan,Y.N.: Near surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods. Magazine of Concrete Research, Vol. 39, No. 141, 1987, S. 183-195.
- /20/ Schwarz,B.: Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen. Gesundheits-Ingenieur, Heft 7, 1972, S. 206-211.

- /21/ Bažant, Z.P.; Najjar, L.J.: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials and Structures*, Vol. 5, Nr. 25, 1972, S. 3-20.
- /22/ Bažant, Z.P.; Najjar, L.J.: Drying of concrete as a nonlinear problem. *Cement and Concrete Research*, Vol. 1, 1971, S. 461-473.
- /23/ Kiebl, K.; Gertis, K.: Nichtisothermer Feuchtetransport in dickwandigen Betonteilen von Reaktordruckbehältern. In: Heft 280 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1977.
- /24/ Hundt, J.; Kantelberg, H.: Sorptionsuntersuchungen an Zementstein, Zementmörtel und Beton. Heft 297 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1978.
- /25/ Schwiete, H.E.: Über die Bestimmung der offenen Porosität in Zementstein. *Tonindustrie Zeitung*, Nr. 12, 1966.
- /26/ Wolfseher, U.; Gertis, K.: Isothermer Gastransport in porösen Stoffen aus gaskinetischer Sicht. Heft 258 des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau, Berlin, 1976.
- /27/ Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt: Prüfungen der Wasserleitfähigkeit, der Frostbeständigkeit und der Frost-Tausalz-Beständigkeit. Richtlinien für die Versuchsdurchführung, 1985.
- /28/ Kreijger, P.C.: The skin of concrete, composition and properties. *Materials and Structures*, Vol. 17, 1984, S. 275-283.
- /29/ Grube, H.; Krell, J.: Zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe von Mörtel und Beton. *Betontechnologische Berichte 1986-1988*, Beton-Verlag, 1989.
- /30/ Rostásy, F.S., Bunte, D.: Physikalische und versuchstechnische Grundlagen zur Dauerhaftigkeitsbeurteilung von Beton (Arbeitstitel), unveröffentlicht.

TABELLEN

Bezeichnung	w/z-Wert	Wassergehalt	Zementgehalt	Zementart	Zuschlaggehalt	Sieblinie	Zusatzstoff
[-]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]	[kg/m ³]	[-]	[kg/m ³]
B1	0,5	163	340	PZ 45 F	1843	0-2 mm: 50 % 2-8 mm: 50 %	-
B2	0,7	220	314	PZ 35 F	1760	0-2 mm: 60 % 2-8 mm: 40 %	-
B3	0,9	220	250	PZ 35 F	1813	0-2 mm: 60 % 2-8 mm: 40 %	-

Tab. 2.2.1: Betonzusammensetzung der Versuchskörper von Abschnitt 2

Bezeichnung der Nachbehandlung	Beschreibung der Nachbehandlungsart
A	- nach einem Tag ausschalen - keine weitere Nachbehandlung
B	- nach einem Tag ausschalen - 2 Tage Wasserbad - 4 Tage unter feuchten Tüchern
C	- nach einem Tag ausschalen - 14 Tage Wasserbad

Tab. 2.2.2: Beschreibung der Nachbehandlungsarten

Bezeichnung der Mischung	Nachbehandlung A	Nachbehandlung B	Nachbehandlung C
B1	ausgeführt	ausgeführt	ausgeführt
B2	ausgeführt	nicht ausgeführt	ausgeführt
B3	nicht ausgeführt	nicht ausgeführt	ausgeführt

Tab. 2.2.3: Zuordnung der zu den einzelnen Mischungen ausgeführten Nachbehandlungsarten

Mischungsbezeichnung	Nachbehandlungsart	Konsistenz		Frischbetonrohddichte (Würfel)
		Ausbreitmaß	Verdichtungsmaß	
[-]	[-]	[cm]	[-]	[kg/m ³]
B1	A	36 ⁽¹⁾	1,17	2.320
	B	40 ⁽²⁾	1,12	2.256
	C	46 ⁽²⁾	1,07	2.240
B2	A	37,5	1,11	2.260
	C	36,5	1,10	2.260
B3	C	36	1,13	2.320

(1) Fließmittelzugabe 2 Gew.-% des Zementanteils

(2) Fließmittelzugabe 3 Gew.-% des Zementanteils

Tab. 2.2.4: Frischbetoneigenschaften der Betone der Betonagen B1 - B3

Bezeichnung	Herstellungsdatum	Beginn der Trocknung	Prüfdatum	Trocknungsdauer
[-]	[-]	[-]	[-]	[Tage]
B1/A	02.03.87	05.03.87	04.05.+05.05.87 je eine Platte 11.05.87; 2 Platten	60 bzw. 61 67
B1/B	09.03.87	17.03.87	20.05.87; 4 Platten	64
B1/C	16.03.87	31.03.87	30.07.87; 1 Platte 23.06.88; 2 Platten	121 450
B2/A	14.04.87	16.04.87	13.07.88; 2 Platten	455
B2/C	27.04.87	12.05.87	29.06.88; 3 Platten	414
B3/C	10.06.87	25.06.87	06.07.88; 3 Platten	367

Tab. 2.2.5: Prüfzeitpunkte und Austrocknungsdauern der Wasserplatten

Bezeichnung	w/z-Wert	Wassergehalt	Zementgehalt	Zementart	Zuschlaggehalt	Sieblinie	Zusatzstoff
[-]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]	[kg/m ³]	[-]	[kg/m ³]
B4	0,5	165	330	PZ 35 F	1860	B/C 32	-
B5	0,85	195,5	230	PZ 35 F	1801	B/C 32	60 (Kalksteinmehl)

Tab. 3.2.1: Betonzusammensetzung der Würfelmischungen

Bezeichnung	Ausbreitmaß	Luftporengehalt	Rohdichte
[-]	[cm]	[Vol.-%]	[kg/m ³]
B4	32	2,4	2.370
B5	38	1,9	2.370

Tab. 3.2.2: Frischbetoneigenschaften der Betonagen B4 und B5

Parameter	Wand							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
w/z-Wert [-]	0,5		0,67		0,85		0,98	
Zementgehalt [kg/m ³]	330		290		230		215	
Zuschlaggehalt [kg/m ³]	1920		1810		1860 1)		1850 2)	
Mischungsverhältnis Z : G : W [Gew.-Teile]	1 : 8,5 : 0,5		1 : 6,2 : 0,67		1 : 8,1 : 0,85		1 : 8,6 : 0,98	
G/(W+Z)	3,9		3,7		4,3		4,4	
Zuschlaganteil [Gew.-%]	79,5		78,8		81,2		81,3	
Zementleimanteil [Gew.-%]	20,5		21,2		18,8		18,7	
Nachbehandlung	- keine - 7 Tage unter feuchten Tüchern und Folie							
Betondeckung	5 bis 30 mm; in Schritten von 5 mm variiert							
Betonierdatum	27.07.87	10.08.87	19.08.87	02.09.87	14.09.87	23.09.87	23.11.87	16.12.87
Nicht variierte Parameter	Zementart: PZ 35 F Sieblinie: B/C 32 Zuschlagart: calzitisch Konsistenz: K2; a ≈ 40 cm Verdichtung: Rüttelflaschen und Schalungsrüttler Nachbehandlungsart: nur wie oben beschrieben Orientierung der im Freien aufgestellten Wände: Ausrichtung in Ost-West Richtung (Witterungsrichtung Nord-Süd) Bewehrung: Nordseite: Einzelstäbe Ø 12; lichter Abstand 20 mm Südseite: Q 221, c = 15 mm							

1) einschließlich 60 kg Kalksteinmehl

2) einschließlich 90 kg Kalksteinmehl

Tab. 4.3.1: Übersicht über die Parametervariation der Wände I bis VIII

Art	Abmessung	Anzahl	Prüfung	Lagerung bei Prüfung	Prüfalter	Anzahl der Prüfungen
[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[Tage]	[-]
Würfel	a = 150	12	Druckfestigkeit	DIN 1048	28	3
				wie die Wände	7 28 90	3 3 3
Zylinder	Ø = 150 l = 300	3	Spaltzugfestigkeit	DIN 1048	28	3
Wasserplatten	b/h/d = 200/200/120	3	Wassereindringprüfung	DIN 1048	28	3
Zylinder	Ø = 150 l = 350	1	E-Modul	DIN 1048	28	1
Platten mit einbetonierten Elektroden	b/h/d = 270/270/60	4	Eichkörper für den Zusammenhang Feuchte - el. Widerstand	ca. 9 Monate Labor 20/70; dann Durchfeuchtung und Trocknung	≤ 400	4
Würfel	a = 300	3	Vergleichskörper zu den Wänden die der Witterung ausgesetzt sind	wie die Wände	Über die Durchführung von Prüfungen an diesen Würfeln wird auf Grund der Ergebnisse der Wandmessungen entschieden	
Platten mit 5-seitiger Styroporummantelung	b/h/d = 350/350/120	3	Vergleichskörper zu den Wänden die nicht der Witterung ausgesetzt sind	Labor bei 20/70; Nachbehandlung wie die Wände		

Tab. 4.3.2: Übersicht über Art, Anzahl, Lagerung und Prüfabsicht der Begleitkörper von Wand I - VIII

Mischungs- bzw. Wandbe- zeichnung	Anzahl der Wände	Anzahl der Teil- mischungen pro Wand- paar	Beton- menge pro Betonage	Konsistenz		Rohdichte		Frisch- beton- tempe- ratur	Luft- poren- gehalt
				Verdich- tungsmaß	Ausbreit- maß	LP-Topf	Würfel		
[-]	[-]	[-]	[Liter]	[-]	[cm]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[°C]	[Vol.-%]
I a b	2	3	360	1,09	33,0	-	2.380	-	2,10
II a b	2	3	400	1,18	34,0	2.350	2.380	22,5	2,40
III a b	2	4	300	-	38,0	-	2.400	24	1,50
IV a b	2	4	285	-	39,0	2.360	2.390	23	1,45
V a b	2	4	285	-	41,0	2.340	2.370	22	1,53
VI a b	2	4	285	-	42,0	2.340	2.390	20	1,45
VII a b	2	4	285	-	52,5	2.350	2.380	20	1,10
VIII a b	2	4	285	-	50,0	2.350	2.380	17	1,10

a Wand ohne Meßelemente
b Wand mit Meßelementen

Tab. 4.3.3: Ergebnisse der Frischbetonprüfungen der Wände I - VIII

Wand- bez.	w/z- Wert	Zement- gehalt 1)	Nach- behand- lung 2)	Druckfestig- keit 3)	Festbetoneigenschaften Spaltzug- festigkeit 4)	E-Modul 5)	Wasserein- dringtiefe 6)
[-]	[-]	[kg/m ³]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[cm]
I	0,5	330	nein	57,0	2,98	-	0,2
II	0,5	330	ja	62,0	3,78	30,4 7)	0,7
III	0,67	290	nein	44,0	3,07	28,4	0,6
IV	0,67	290	ja	44,0	2,95	27,2	2,2
V	0,85	230	nein	33,0	2,38	26,5	2,7
VI	0,85	230	ja	35,0	2,72	26,9	2,3
VII	0,98	215	nein	25,0	2,11	26,3	0,9
VIII	0,98	215	ja	26,0	1,92	25,1	6,7

1) Zementart: PZ 35 F

2) nähere Erläuterungen zu den ausgeführten Nachbehandlungsarten siehe Abschnitt 4.3.5

3) Mittelwert aus 3 Würfeln mit a = 150 mm Kantenlänge

4) Mittelwert aus 3 Zylindern

5) Ergebnis der Prüfung eines einzelnen Zylinders Ø 150 mm; h = 350 mm

6) Mittelwert von 3 Wasserplatten

7) Betonalter: 37 Tage

Tab. 4.3.4: Festbetoneigenschaften der Begleitkörper der Wände I - VIII

Alter [Tage]	Wand- bezeich- nung	Anzahl der ISA-Messungen für die Beton- deckung c = [cm]							Anzahl der Wassereindringprüfungen für die Betondeckung c = [cm]						
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	u.R.	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	u.R.
28 - 56	I b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	II b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	III b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	IV b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	V b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	VI b	-	1	-	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-
	VII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VIII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57 - 120	I b	2	2	2	2	2	2	4	-	-	-	-	-	-	-
	II b	1	2	1	2	1	2	3	-	-	-	-	-	-	-
	III b	1	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-
	IV b	1	-	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	V b	-	1	-	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-
	VI b	1	-	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	VII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VIII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
121 - 180	I b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	II b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	III b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IV b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	V b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VI b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VII b	2	1	2	1	2	1	3	-	2	-	2	-	2	2
	VIII b	3	1	3	1	3	1	4	-	2	-	2	-	2	2
181 - 240	I b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	II b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	III b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IV b	1	-	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	V b	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	1
	VI b	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	1
	VII b	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2
	VIII b	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2
241 - 400	I b	2	1	2	1	2	1	3	2	1	2	1	2	1	3
	II b	2	-	2	-	2	-	2	2	2	2	2	2	2	4
	III b	1	2	1	2	1	2	3	2	1	2	1	2	1	3
	IV b	2	2	2	2	2	2	4	2	-	2	-	2	-	2
	V b	3	2	3	2	3	2	5	2	-	2	-	2	-	2
	VI b	-	1	-	1	-	1	1	1	2	1	2	1	2	3
	VII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VIII b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28 - 400	I b	5	4	5	4	5	4	9	2	1	2	1	2	1	3
	II b	4	3	4	3	4	3	7	2	2	2	2	2	2	4
	III b	3	4	3	4	3	4	7	2	1	2	1	2	1	3
	IV b	5	3	5	3	5	3	8	2	-	2	-	2	-	2
	V b	5	4	5	4	5	4	9	2	1	2	1	2	1	3
	VI b	2	2	2	2	2	2	4	1	3	1	3	1	3	4
	VII b	3	2	3	2	3	2	5	1	3	1	3	1	3	4
	VIII b	4	2	4	2	4	2	6	1	3	1	3	1	3	4
Σ je Betondeckung		31	24	31	24	31	24	55	13	14	13	14	13	14	27
Gesamtsumme		-	-	-	-	-	-	220	-	-	-	-	-	-	108

Tab. 4.4.1: Zeitplan der Bauwerksmessungen

	Alter [Tage]	Untersuchte Wandtiefe [cm]	Anzahl der Versuche zu den Prüfungen			Summe der Prüf- anzahl
			Diffusion	Kapillar- leitung	Vacuum- sättigung	
Pro Wand	28	c = 0,5	1	1	1	3
		1,0	1	1	1	3
		1,5	1	1	1	3
		2,0	2	1	1	4
		2,5	2	1	1	4
		3,0	2	1	1	4
		Σ	9	6	6	21
		Wandmitte	8	3	3	14
		unb. Rand	3	3	3	9
		Σ 28 Tage	20	12	12	44
	90	c = 0,5	1	1	1	3
		1,0	-	-	-	-
		1,5	1	1	1	3
		2,0	-	-	-	-
		2,5	2	1	1	4
		3,0	-	-	-	-
		Σ	4	3	3	10
		Wandmitte	7	3	3	13
		unb. Rand	3	3	3	9
		Σ 90 Tage	14	9	9	32
	180	c = 0,5	-	-	-	-
		1,0	1	1	1	3
		1,5	-	-	-	-
		2,0	2	1	1	4
		2,5	-	-	-	-
		3,0	2	1	1	4
		Σ	5	3	3	11
		Wandmitte	6	3	3	12
		unb. Rand	2	3	3	8
		Σ 180 Tage	13	9	9	31
	360	c = 0,5	1	1	1	3
		1,0	1	1	1	3
		1,5	1	1	1	3
		2,0	2	1	1	4
		2,5	2	1	1	4
		3,0	2	1	1	4
		Σ	9	6	6	21
		Wandmitte	8	3	3	14
		unb. Rand	3	3	3	9
		Σ 360 Tage	20	12	12	44
	alle Alter	alle Tiefen	67	42	42	151
alle Wände	Gesamtsumme		536	336	336	1208

Tab. 4.4.2: Zeitplan der Laborversuche (Prüfart, Probenanzahl, Prüfumfang)

Eigenschaft	Darstellungsart G: Graph H: Histogramm	Nr. der Bilder, in denen zum angegebenen Wandbereich die aufgeführte Betoneigenschaft dargestellt ist:		
		Betondeckung	Wandmitte	unbewehrter Rand
A	G	4.6.1 ÷ 4.6.8		
	H		4.6.9 ÷ 4.6.16	4.6.17 ÷ 4.6.24
B	G	4.6.25 ÷ 4.6.32		
	H		4.6.33 ÷ 4.6.40	4.6.41 ÷ 4.6.48
ψ	G	4.6.49 ÷ 4.6.56		
	H		4.6.57 ÷ 4.6.64	4.6.65 ÷ 4.6.72
$\epsilon_{\text{füll}}$	G	4.6.73 ÷ 4.6.80		
	H		4.6.81 ÷ 4.6.88	4.6.89 ÷ 4.6.96
ϵ_{ges}	G	4.6.97 ÷ 4.6.104		
	H		4.6.105 ÷ 4.6.112	4.6.113 ÷ 4.6.120
D_{CO_2}	G	4.6.121 ÷ 4.6.128	4.6.129 ÷ 4.6.136	4.6.137 ÷ 4.6.144
	H			

Tab. 4.6.1: Ordnungsschema der Bildnummern zu Abschnitt 4.6.2

BETONDECKUNG						
Einflußparameter auf die Größe und Streubreite der Ergebnisse	Art und Umfang den der untersuchte Parameter auf die zu betrachtende Eigenschaft ausübt					
	A <i>Wasseraufnahme kg / m² / 28</i>	B <i>Wassereindringkoeff. m / 28</i>	ψ Vol % <i>Wasserkapazität</i>	$\epsilon_{\text{füll}}$ <i>Porosität</i>	ϵ_{ges} <i>Vakuum Poros.</i>	D_{CO_2}
Beton der Betondeckung	bei allen Wänden zeigt sich für jede der 4 Altersstufen kein Einfluß der Dicke der Betondeckung	die Dicke der Betondeckung hat keinen signifikanten Einfluß auf die Größe des Wassereindringkoeff.	Abhängigkeit der Größe der Wasserkapazität von der Dicke der Betondeckung ist nicht feststellbar	die Dicke der Betondeckung hat keinen signifikanten Einfluß auf die Größe der füllbaren Porosität	unabhängig von der Dicke der Betondeckung	die Größe des Diffusionskoeffizienten ist abhängig von der PROBENDICKE
Betonalter	mit zunehmendem Betonalter nimmt der Wasseraufnahmekoeffizient monoton ab	es ist keine eindeutige zeitliche Entwicklung erkennbar. Streubreite und Größenordnung der 28 Tage Werte größer als die älterer Proben	Wände I-IV: keine zeitliche Entwicklung erkennbar Wände V-VIII: ψ wird mit zunehmendem Alter kleiner	eine zeitliche Entwicklung ist nicht erkennbar; Streubreite der Werte pro Altersstufe vergleichbar derjenigen aller Altersstufen	keine zeitliche Entwicklung erkennbar; Streubreite der Werte pro Altersstufe vergleichbar derjenigen aller Altersstufen zusammen	eine stetig und monoton fallende zeitliche Entwicklung ist nicht erkennbar
Nachbehandlungswirkung	nur im Alter von 28 Tagen weisen Proben aus nachbehandelten Wänden einen geringeren Wasseraufnahmekoeff. auf	nur an Hand der Ergebnisse der 28-Tage alten Proben nachweisbar; nachbehandelte Wände haben geringere Streubreite	Kein Einfluß der Nachbehandlung erkennbar (auch nicht bei den 28 Tage alten Proben)	die Nachbehandlung hat keinen Einfluß auf die Größe und Streubreite der füllbaren Porosität	Nachbehandlung der hier gewählten Art führt nicht zu einer Verringerung der Gesamtporosität	kein Einfluß der Nachbehandlung erkennbar
Betonzusammensetzung	mit zunehmendem w/z-Wert ist der Alterseinfluß deutlicher ausgeprägt, die Werte für A werden größer	mit zunehmendem w/z-Wert nimmt der Wassereindringkoeffizient zu	der Einfluß des w/z-Wertes macht sich in sofern bemerkbar, daß die Wände I-III gegen IV-VIII abgrenzbar sind	füllbare Porosität und Streubreite der Werte nimmt mit zunehmendem w/z-Wert zu	Einfluß des w/z-Wertes nur in sofern erkennbar daß Wände I-III gegen Wände IV-VIII abgrenzbar sind	mit zunehmendem w/z-Wert ist die Abhängigkeit von der Dicke der Proben weniger deutlich ausgeprägt

Tab. 4.6.2: Einflüsse auf die Ergebnisse der Dichtigkeits- und Porositätsmessungen an Proben entnommen aus den verschieden dicken Betondeckungen

WANDMITTE						
Einflußparameter auf die Größe und Streubreite der Ergebnisse	Art und Umfang den der untersuchte Parameter auf die zu betrachtende Eigenschaft ausübt					
	A	B	ψ	$\epsilon_{\text{füll}}$	ϵ_{ges}	D_{CO_2}
Betonalter	keine zeitliche Entwicklung feststellbar	keine zeitliche Entwicklung erkennbar, nur die 28 und 90 Tage Werte von Wand I-III sind deutlich größer als die übrig. Alter	Wand I-III: Zunahme mit Zunahme des Alters Wand IV-VIII: keine zeitliche Entwicklung erkennbar	Wand I-IV: keine zeitliche Entwicklung erkennbar Wand V-VIII: Porositätsabnahme mit zunehmendem Alter	keine zeitliche Entwicklung feststellbar	nur für die Wände IV-VIII ist eine Abnahme des Diffusionskoeffizienten mit zunehmendem Betonalter erkennbar
Gleichmäßigkeit der Herstellung a) Streubreite der Werte eines Alters b) Vergleich gleicher Wände unter unterschiedlicher Nachbehandlung	a) in der Regel kleiner als 0,1-0,2 kg/m ² /h b) mit Ausnahme des Wandpaares III/IV sind die beiden Betonagen vergleichbar	a) mit Ausnahmen gut reproduzierbare Ergebnisse b) mit Ausnahme des Wandpaares III/IV sind die beiden Betonagen vergleichbar	a) Wände I-III größere Streubreite als bei den übrigen Wänden b) alle Wandpaare haben vergleichbare Wasserkapazitäten	a) geringe Streubreite; in der Regel < 2 Vol.-% b) alle Wandpaare haben vergleichbare füllbare Porositäten	a) geringe Streubreite; in der Regel < 2 Vol.-% b) alle Wandpaare haben vergleichbare Gesamtporositäten	a) Werte streuen bis zum Faktor 3 b) Wandpaare haben vergleichbare Diffusionskoeffizienten
Betonzusammensetzung	mit steigendem w/z-Wert Zunahme des Wasseraufnahmekoeffizienten	Wände IV-VIII weisen nahezu gleich große Wassereindringkoeff. auf	Wände III-VIII: alle Wasserkapazitäten liegen zwischen 10 und 15 Vol.-%	die Werte aller Wände liegen zwischen 12 und 16 Vol.-%	die Gesamtporosität aller Wände schwankt zwischen 13 und 17 Vol.-%	mit steigendem w/z-Wert Zunahme des Diffusionskoeffizienten
Vergleich der Ergebnisse Wandmitte-Betondeckung	Wand I-IV: Werte Wandmitte und Betondeckung haben gleiche Größenordnung Wand V-VIII: Werte Wandmitte deutlich kleiner als die für die Betondeckungen	nur in Ausnahmefällen sind die Werte der Proben der Wandmitte kleiner als die der Proben der Betondeckungen	Werte für die Wandmitte im allgemeinen kleiner als die für die Betondeckungen	Werte der Wandmitte liegen im unteren Streubereich der Werte der Betondeckungen	Wand I-IV: Werte Wandmitte größer als für Betondeckungen Wand V-VIII: Werte Wandmitte kleiner gleich denen der Betondeckungen	die Werte sind von vergleichbarer Größenordnung

Tab. 4.6.3: Einflüsse auf die Ergebnisse der Dichtigkeits- und Porositätsmessungen an Proben entnommen der Wandmitte

OBERFLÄCHENNAHER BEREICH DER UNBEWEHRTEN WANDSEITE						
Einflußparameter auf die Größe und Streubreite der Ergebnisse	Art und Umfang den der untersuchte Parameter auf die zu betrachtende Eigenschaft ausübt					
	A	B	ψ	$\epsilon_{füll}$	ϵ_{ges}	D_{CO_2}
Betonalter	mit zunehmendem Betonalter nimmt der Wasseraufnahmekoeff. ab	mit zunehmendem Betonalter nimmt der Wassereindringkoeff. ab	keine eindeutige zeitliche Entwicklung erkennbar	keine eindeutige zeitliche Entwicklung erkennbar	keine eindeutige zeitliche Entwicklung erkennbar	keine eindeutige zeitliche Entwicklung erkennbar
Nachbehandlungswirkung	nur bei 28 Tage alten Proben ist für nachbeh. Wände A kleiner als bei nicht nachbeh.	Größe des Wertes des Wassereindringkoeff. ist unabhängig von der Nachbehandlung	keine Verringerung der Werte für die Wasserkapazität durch Anwendung einer Nachbehandlung	Werte sind uneinflußt von der Nachbehandlungsart	Werte sind uneinflußt von der Nachbehandlungsart	Werte sind uneinflußt von der Nachbehandlungsart
Betonzusammensetzung	mit steigendem w/z-Wert nehmen auch die Werte des Wasseraufnahmekoeffizienten zu	mit steigendem w/z-Wert nehmen die Werte des Wassereindringkoeffizienten zu	bei Wand IV Zunahme von ψ mit Zunahme des w/z-Wertes, ab Wand V $\psi = \text{const.}$	Werte sind für alle Wände nahezu const. (ca. 14 - 17 Vol.-%)	mit zunehmendem w/z-Wert nimmt auch die Gesamtporosität zu (von 15 auf 20 Vol.-%)	für Wand V, VII und VIII sind die 360 Tage Werte deutlich kleiner als die übrigen Alter
Vergleich der Ergebnisse unb. Rand - Wandmitte	nur bei Wand VII und VIII ist der Wasseraufnahmekoeff. des unb. Rands größer als der in Wandmitte	Wand I-IV: Werte Wandmitte größer als unb. Rand Wand V-VIII: Werte unb. Rand größer als die in Wandmitte	Wand I+II: Werte beider Tiefen von vergleichbarer Größe; übrige Wände: Werte unb. Rand größer als die in Wandmitte	Werte des unb. Rands sind größer als die der Wandmitte	Werte des unb. Rands sind größer als diejenigen der Wandmitte	Werte beider Tiefenbereiche sind vergleichbar
Vergleich der Ergebnisse unb. Rand - Betondeckung	Werte des unb. Rands sind kleiner als die der Betondeckung	Wand I+II: Werte unb. Rand größer als die der Betondeckung; übrige Wände: Werte beider Tiefen vergleichbar	für beide Tiefenbereiche ergeben sich Werte vergleichbarer Größenordnung	Werte beider Tiefenbereiche sind von vergleichbarer Größenordnung	Werte beider Tiefenbereiche sind von vergleichbarer Größenordnung	Werte beider Tiefenbereiche sind vergleichbar

Tab. 4.6.4: Einflüsse auf die Ergebnisse der Dichtigkeits- und Porositätsmessungen an Proben entnommen dem oberflächennahen Bereich der unbewehrten Wandseite

Rel. Feuchte [%]	Wand		Betonfeuchte [Gew.-%]	Alter [Tage]
	Beton- deckung	unb. Rand		
72 46		II II	3,3 3,0	267 355
55	III	III	2,4 2,4	257
96	III	III	2,0 2,2	380
90	III	III	2,2 2,3	353
34	IV	IV	2,4 3,5	239
63	IV	IV	2,4 3,2	246
55	IV	IV	2,6 3,4	307
70	IV	IV	2,3 2,9	342
70	IV	IV	1,8 2,4	375
35	V	V	2,3 2,5	226
42	V	V	2,2 2,3	245
51	V	V	2,3 2,5	269
52	V	V	2,3 2,5	294
50	V	V	2,3 2,3	329
63	V	V	2,0 2,2	363
80	VI	VI	1,9 3,1	217
58	VI	VI	1,9 2,6	280

Tab. 4.7.1: Gegenüberstellung der rel. Feuchte und des Feuchtegehalts des Betons der Betonoberfläche

ABBILDUNGEN

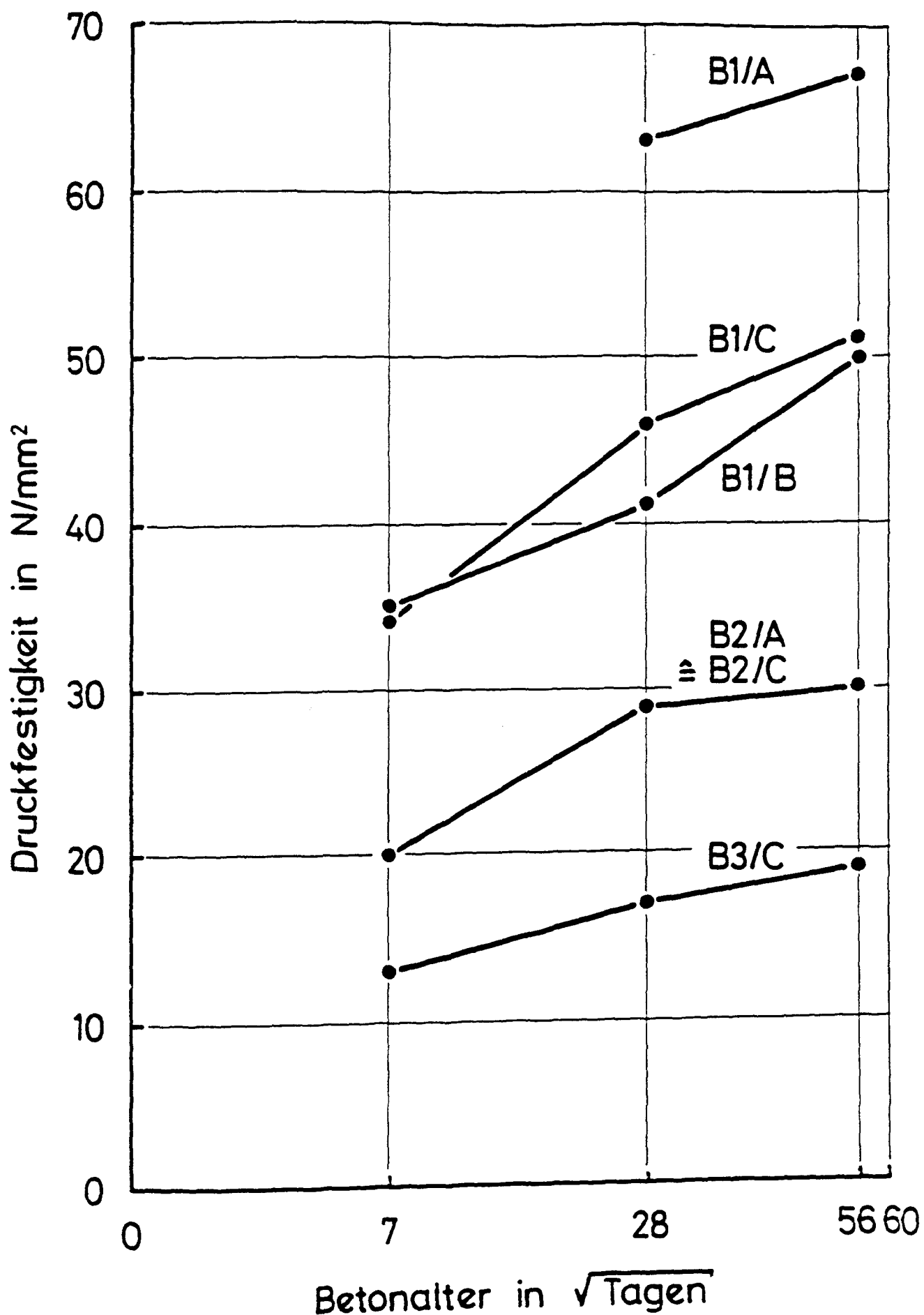
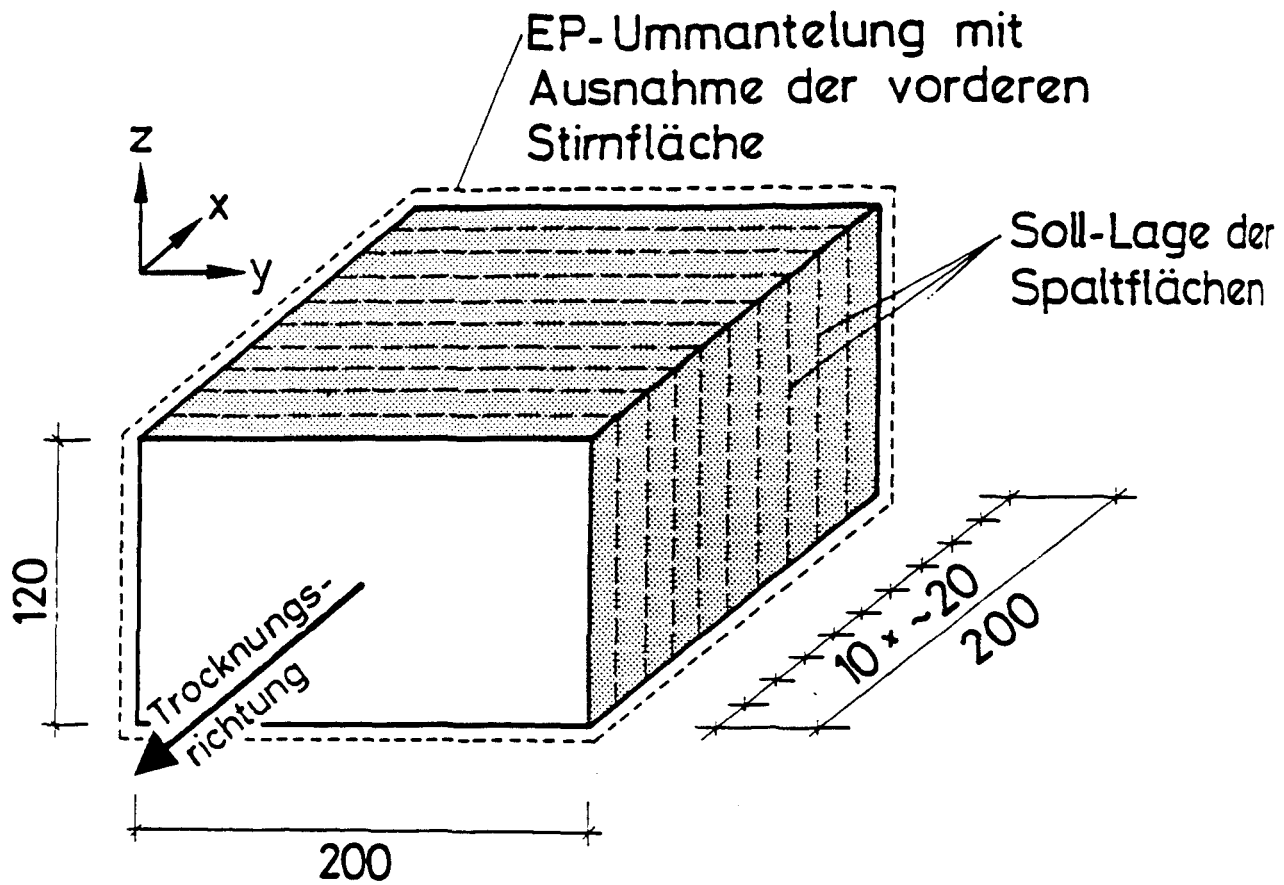
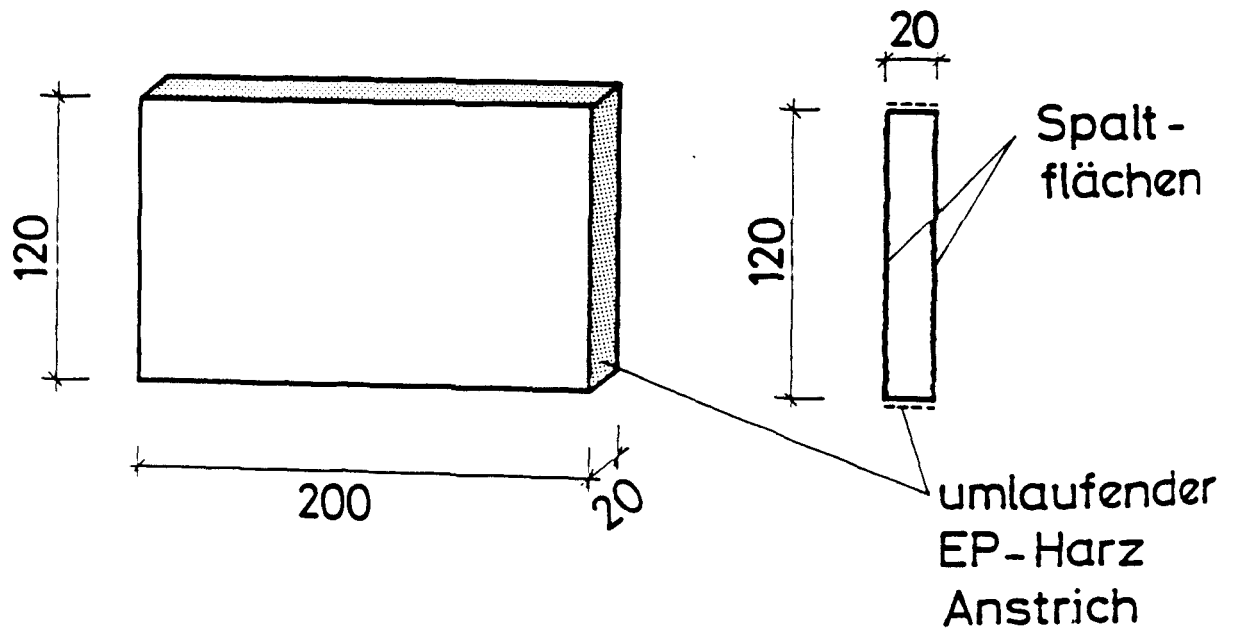


Bild 2.1 : Druckfestigkeitsentwicklung des Betons der Betonagen B1 bis B3. (Lagerung der Würfel mit einer Kantenlänge von $a = 150 \text{ mm}$ nach DIN 1048)



Geometrie der Spaltkörper :



alle Maße in mm

Bild 2.2 : Aufspaltung der Wasserplatten.

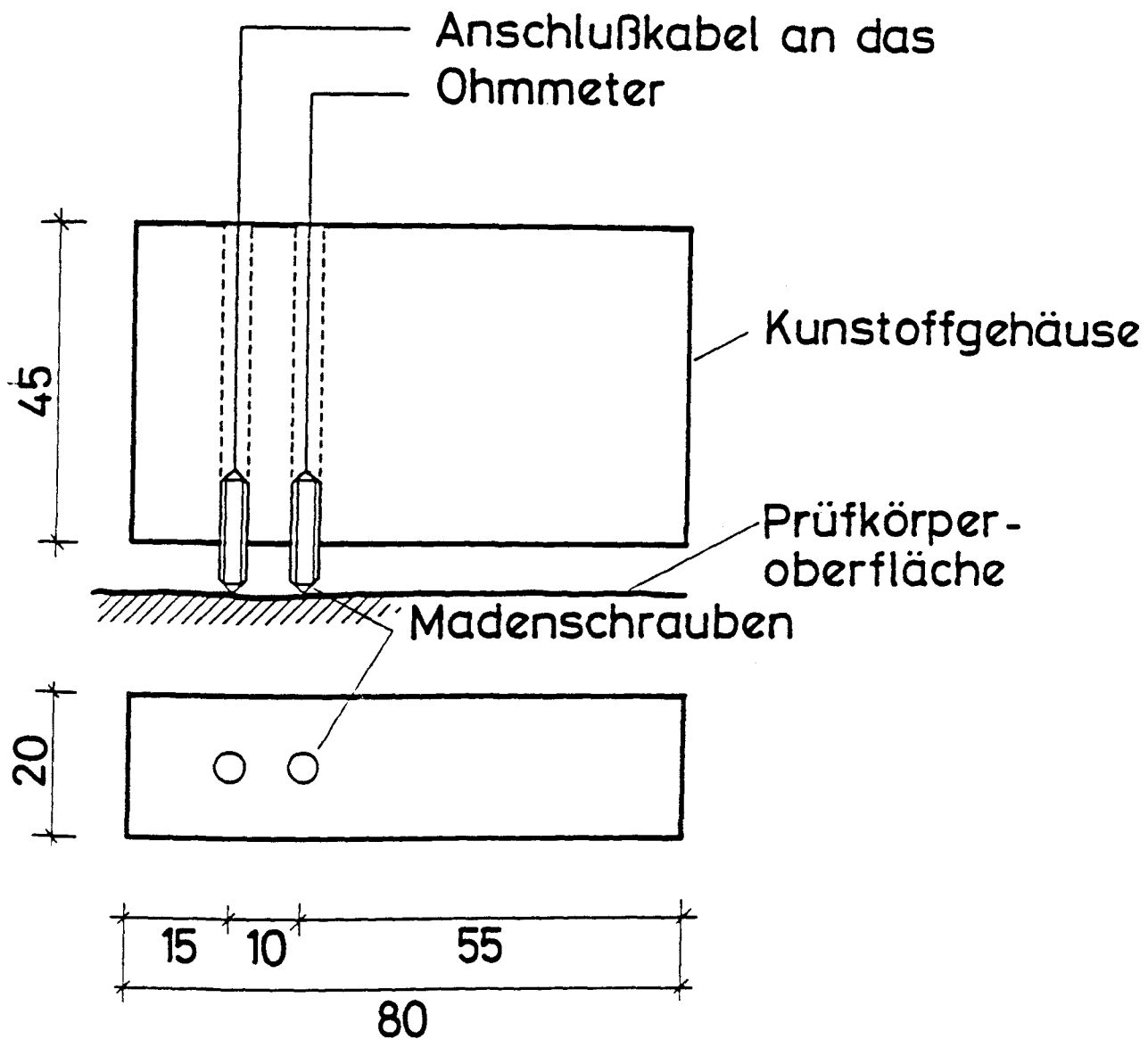


Bild 2.3 : Meßkopf zur Bestimmung des elektrischen Widerstands auf Betonoberflächen.

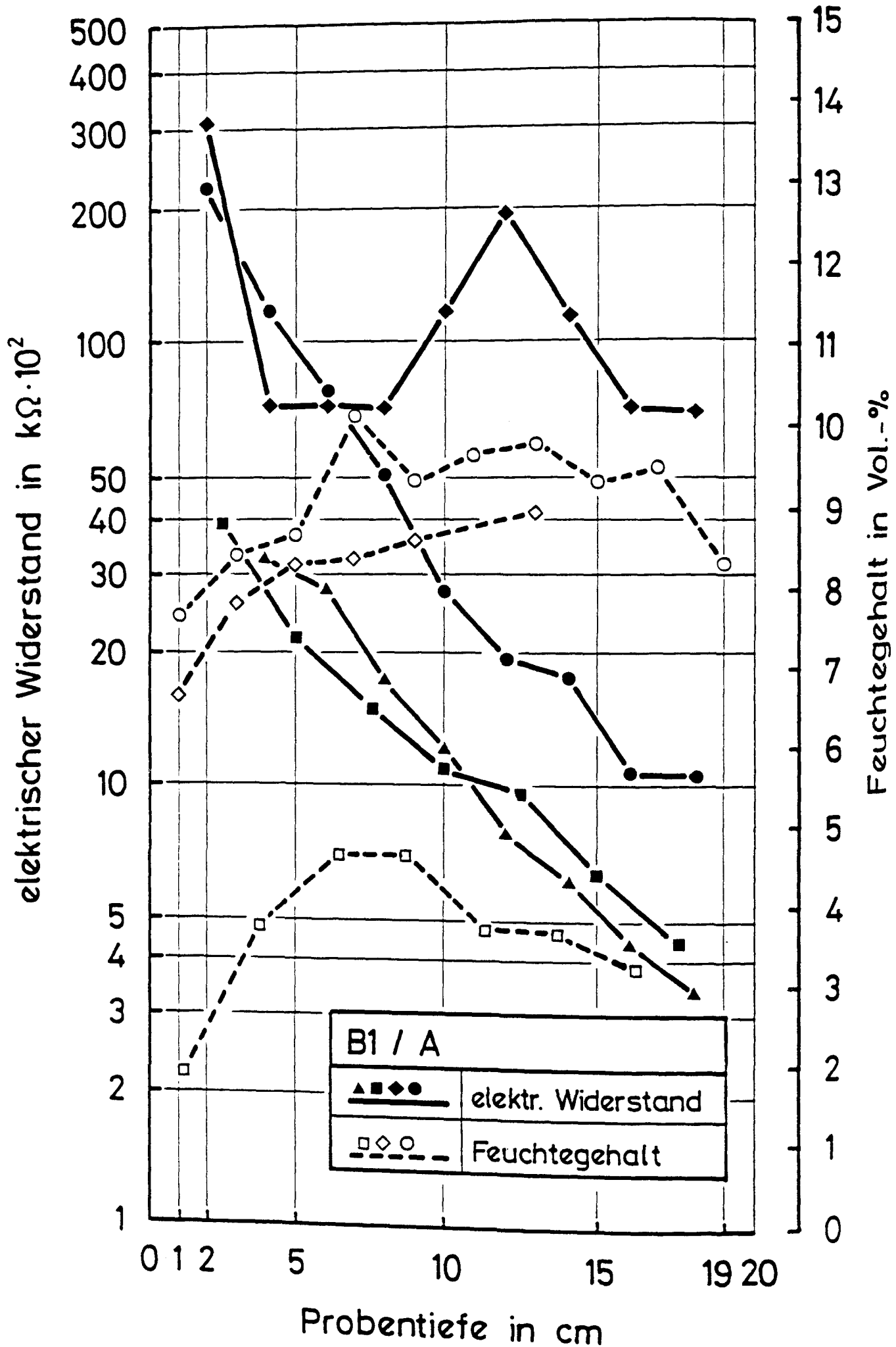


Bild 2.4 : Feuchte- und Widerstandsprofile der aufgespaltenen Wasserplatten der Betonage B1/A. (Trocknungsdauer ca. 60 Tage)

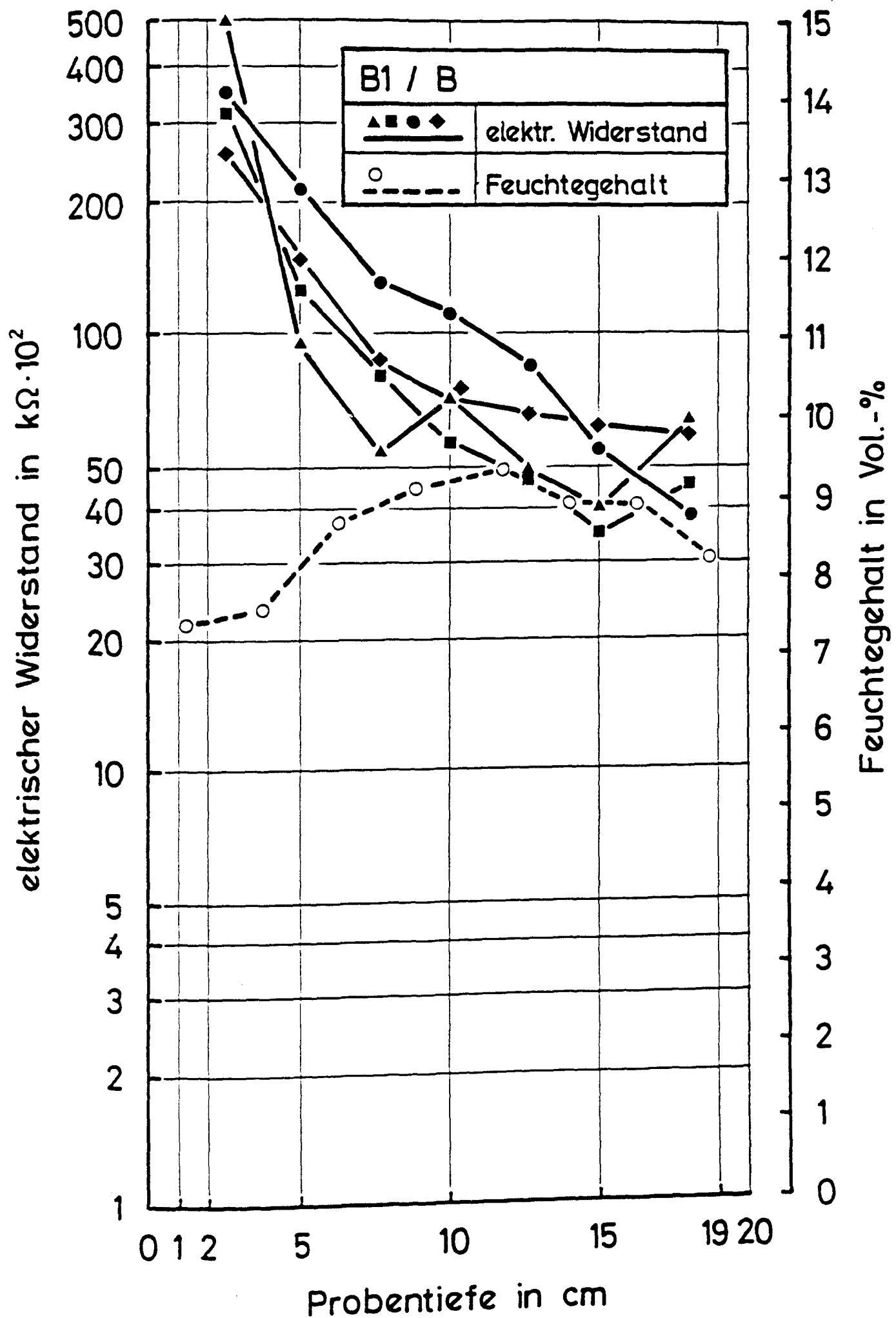


Bild 2.5 : Feuchte- und Widerstandsprofile der aufgespaltenen Wasserplatten der Betonage B1/B. (Trocknungsdauer ca. 60 Tage)

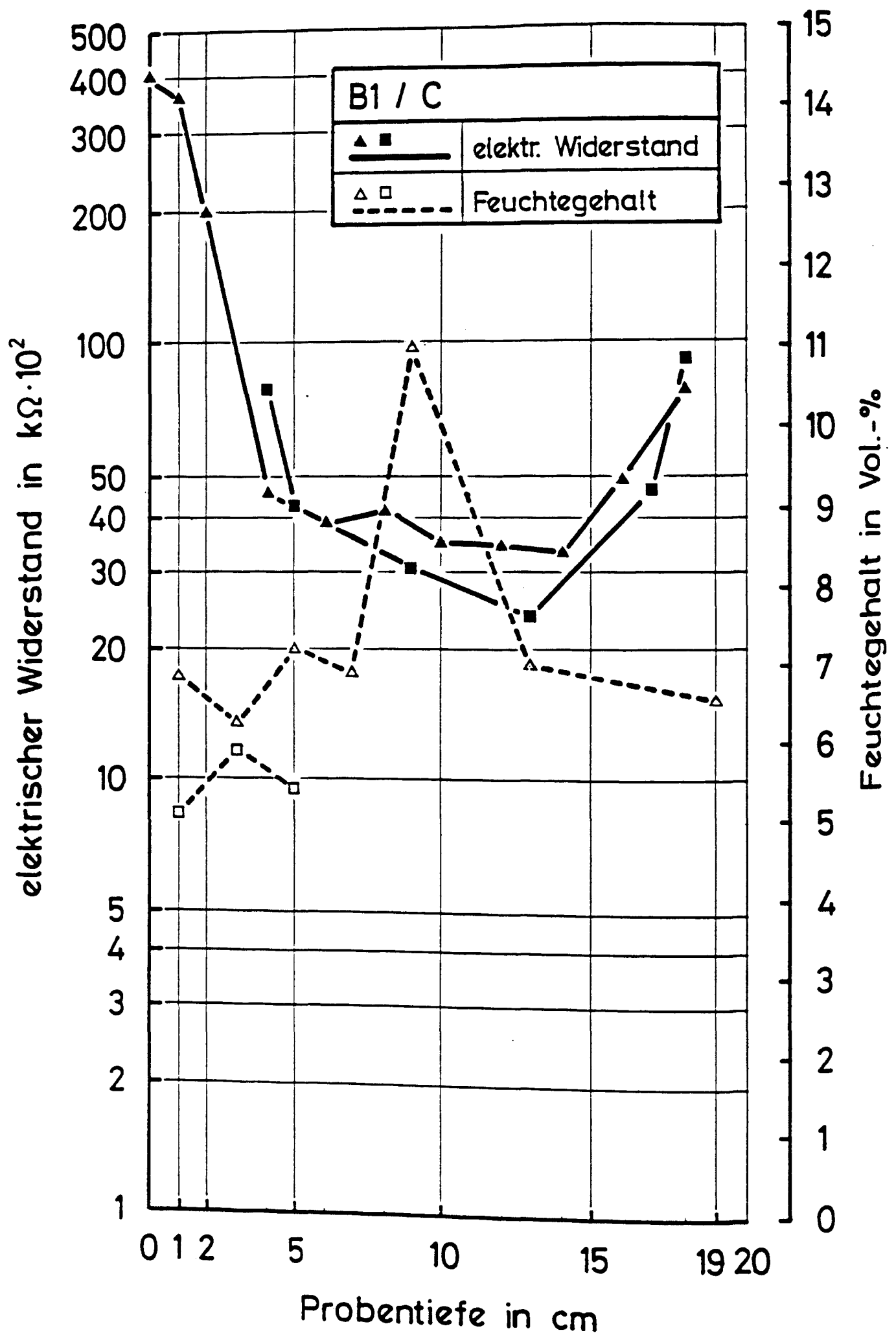


Bild 2.6 : Feuchte- und Widerstandsprofile der aufgespaltenen Wasserplatten der Betonage B1/C. (Trocknungsdauer ca. 120 Tage)

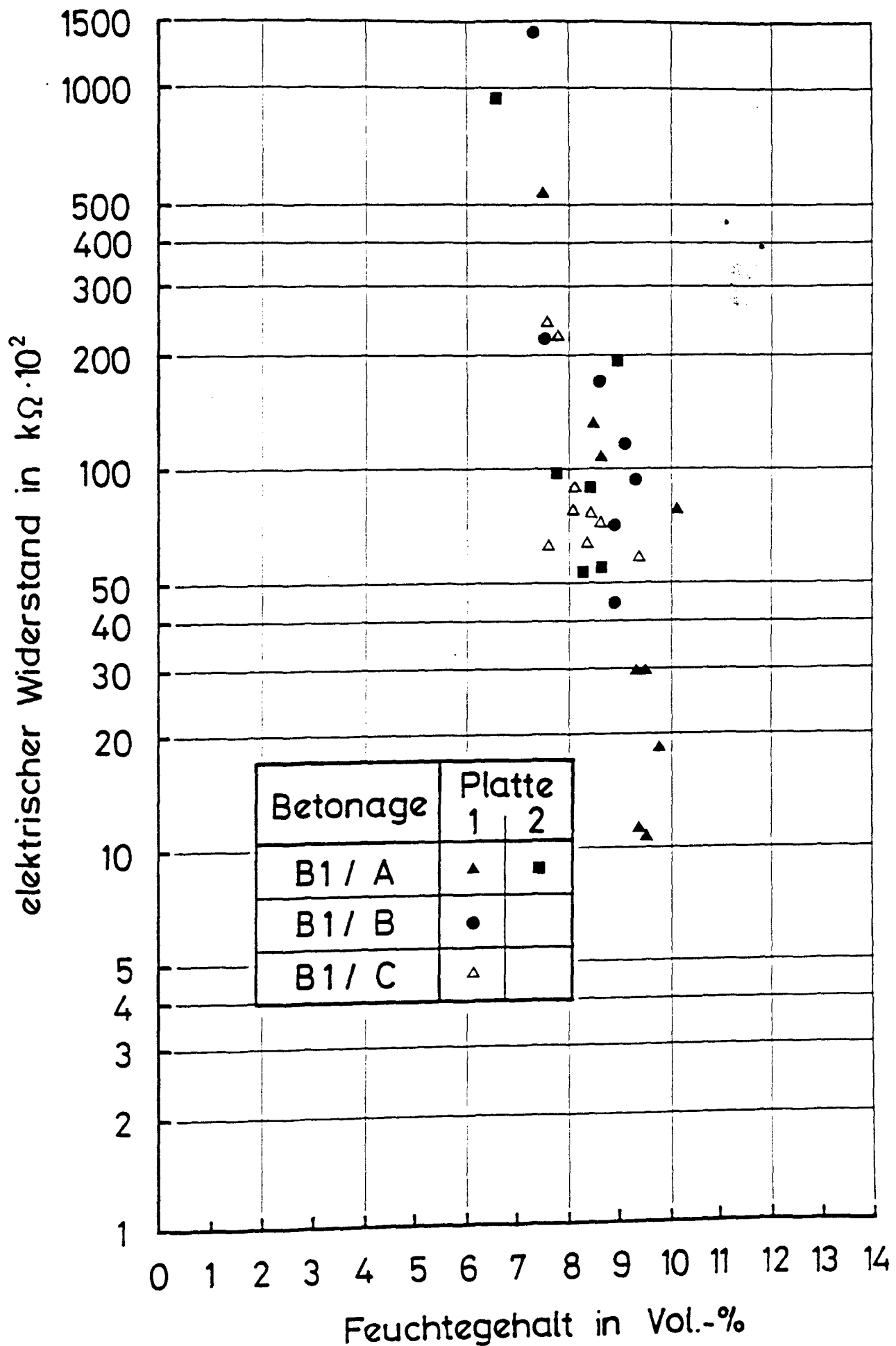


Bild 2.7 : Abhängigkeit des elektrischen Widerstands vom Feuchtegehalt für Spaltkörper der Wasserplatten der Betonagen B1/A bis B1/C. (Trocknungsdauer ca. 60 bzw. 120 Tage)

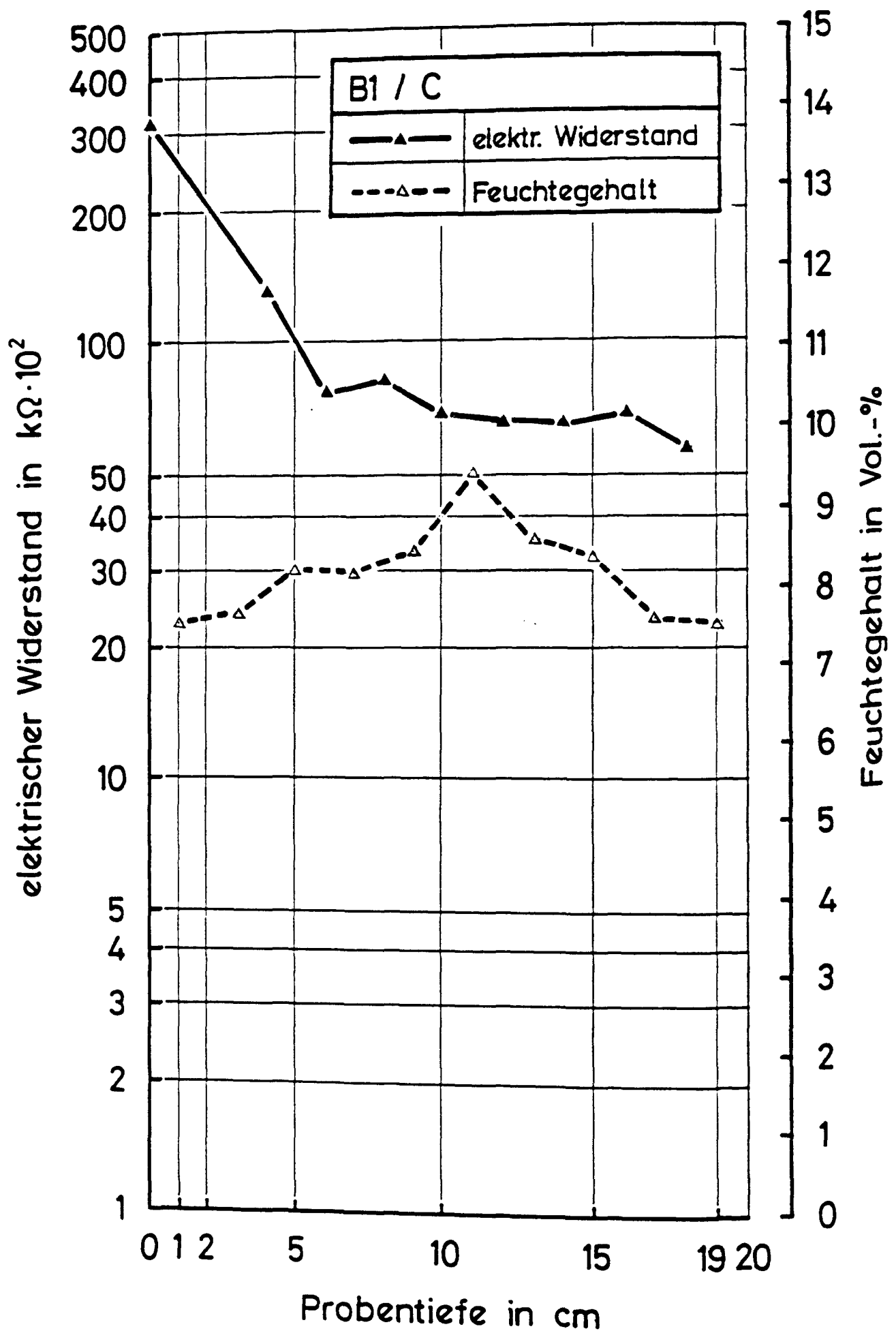


Bild 2.8 : Feuchte- und Widerstandsprofile der aufgespaltenen Wasserplatten der Betonage B1/C. (Trocknungsdauer ca. 450 Tage)

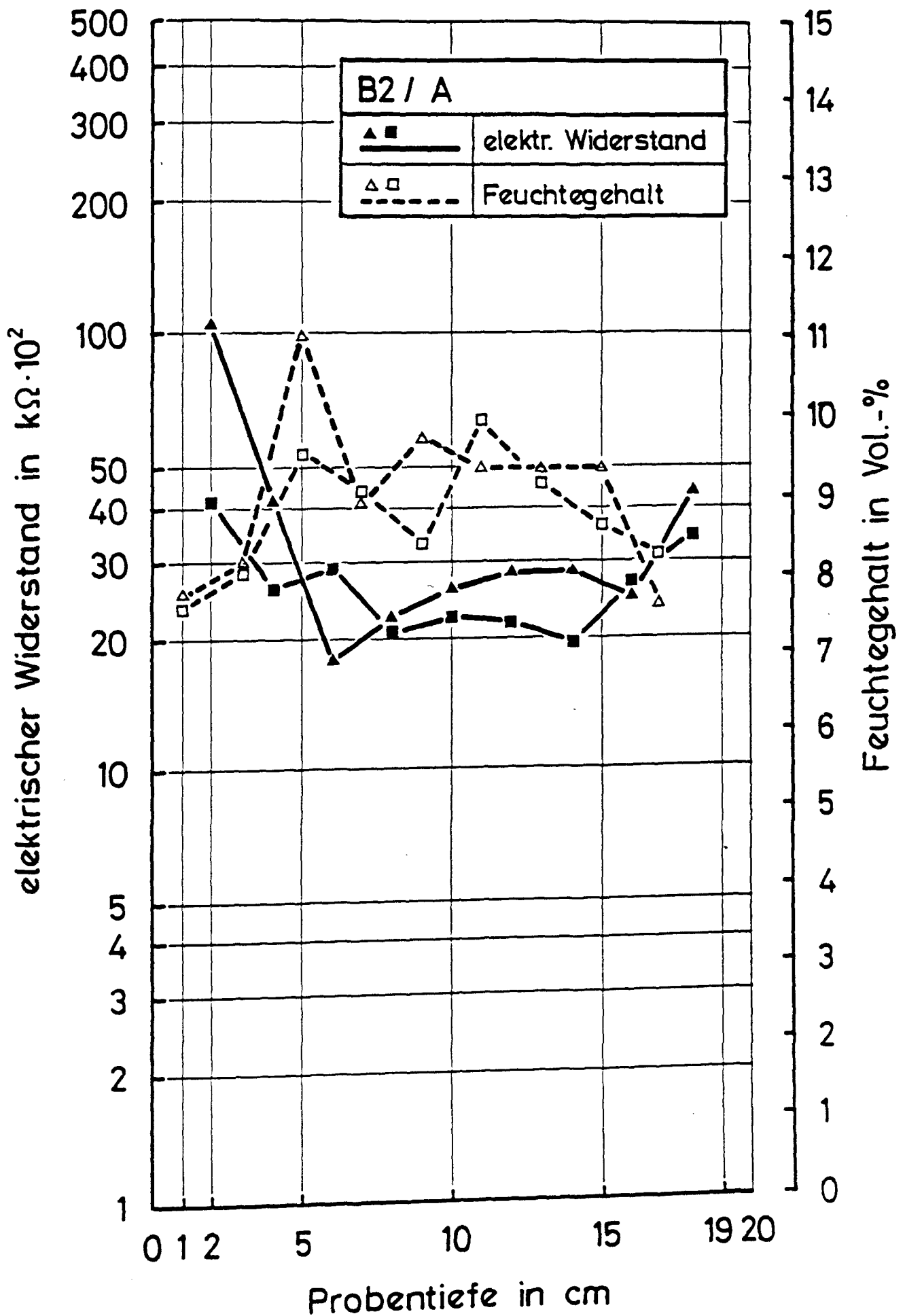


Bild 2.9 : Feuchte- und Widerstandsprofile der aufgespaltenen Wasserplatten der Betonage B2/A. (Trocknungsdauer ca. 455 Tage)

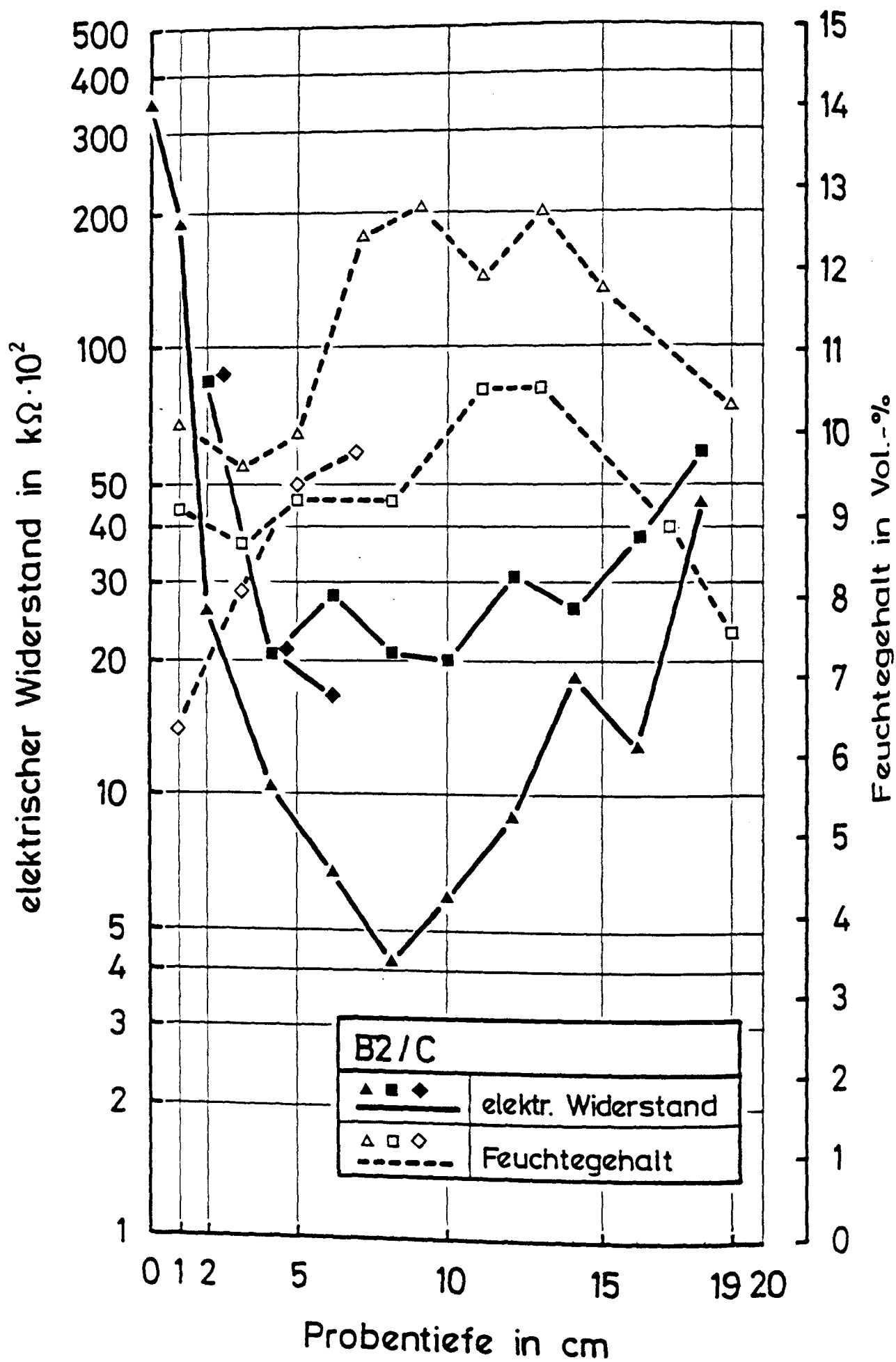


Bild 2.10 : Feuchte- und Widerstandsprofile der aufgespaltenen Wasserplatten der Betonage B2/C. (Trocknungsdauer ca. 414 Tage)

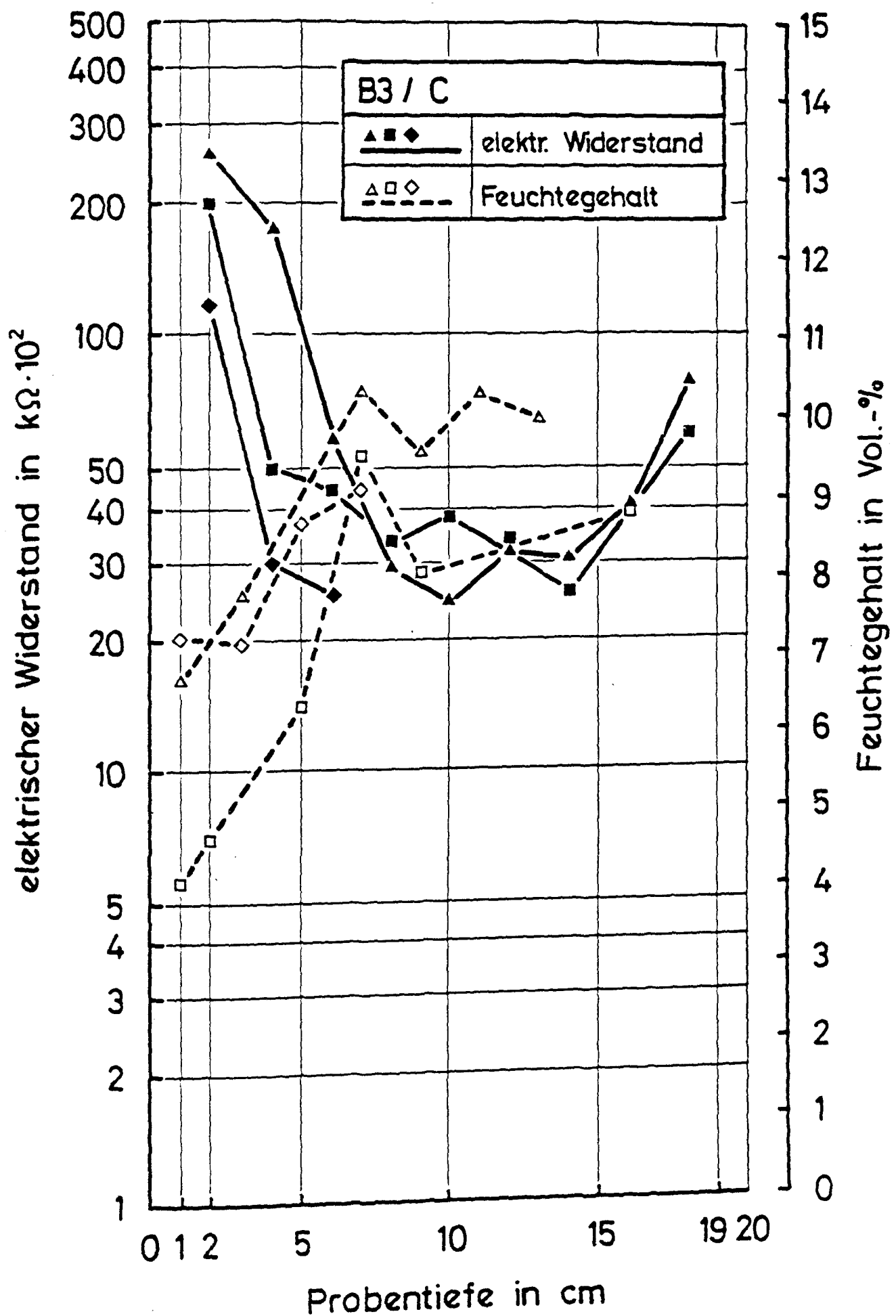


Bild 2.11 : Feuchte- und Widerstandsprofile der aufgespaltenen Wasserplatten der Betonage B3/C. (Trocknungsdauer ca. 367 Tage)

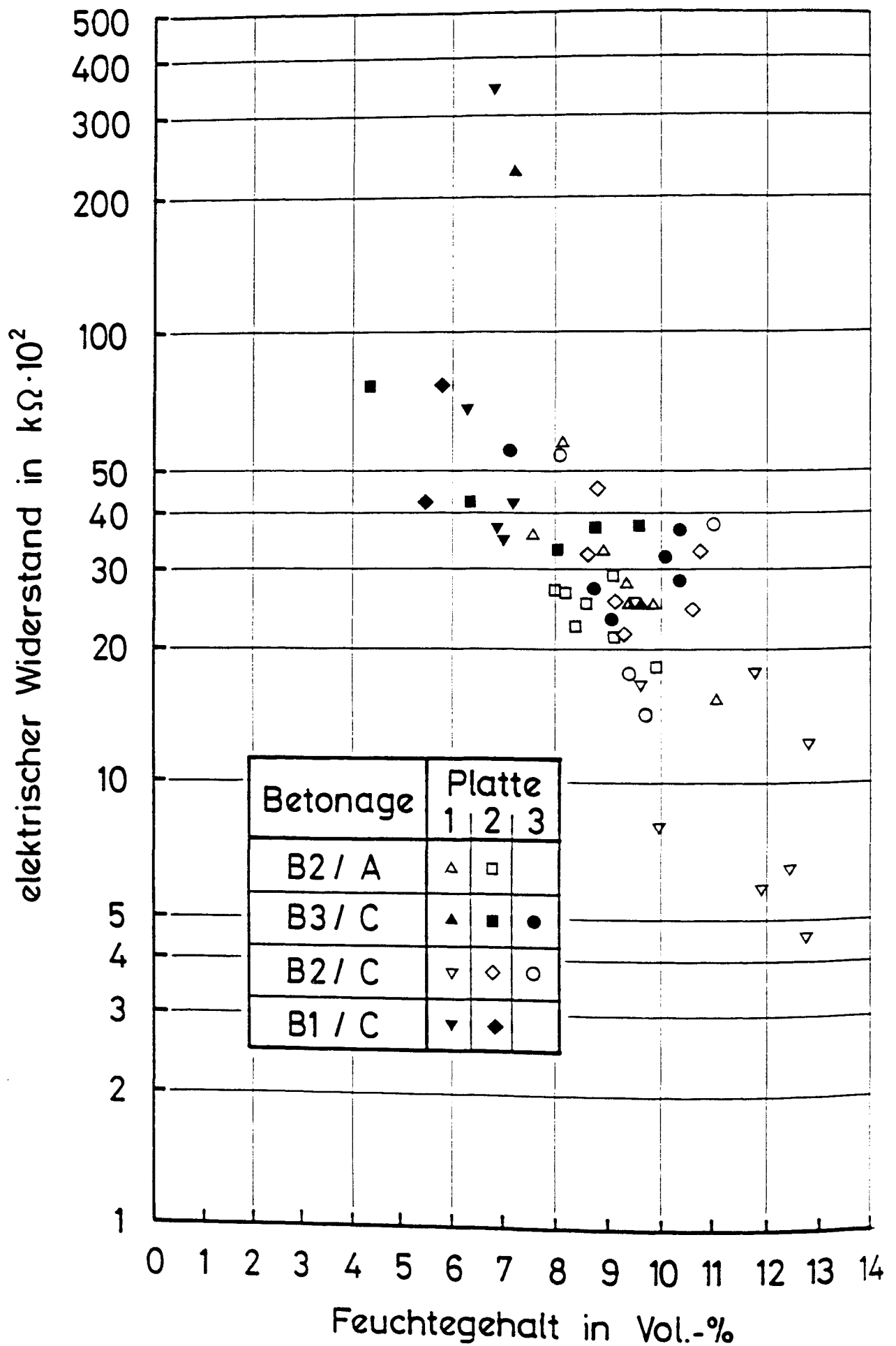


Bild 2.12 : Abhängigkeit des elektrischen Widerstands vom Feuchtegehalt für Spaltkörper der Wasserplatten der Betonagen B1/C, B2/A, B2/C und B3/C. (Trocknungsdauer 367 bis 455 Tage)

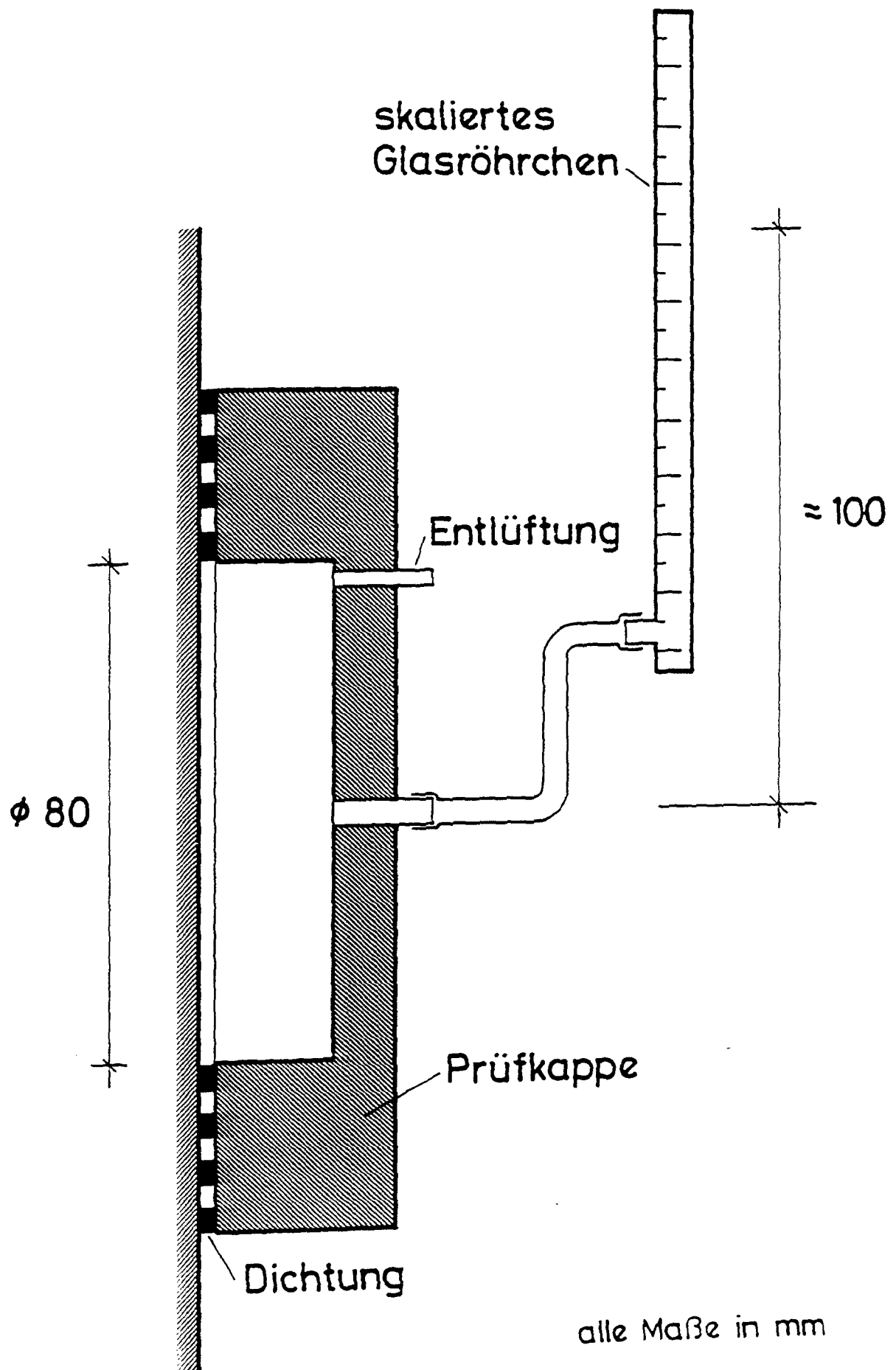


Bild 3.1 : Skizze des Versuchsaufbaus der Wassereindringprüfung.

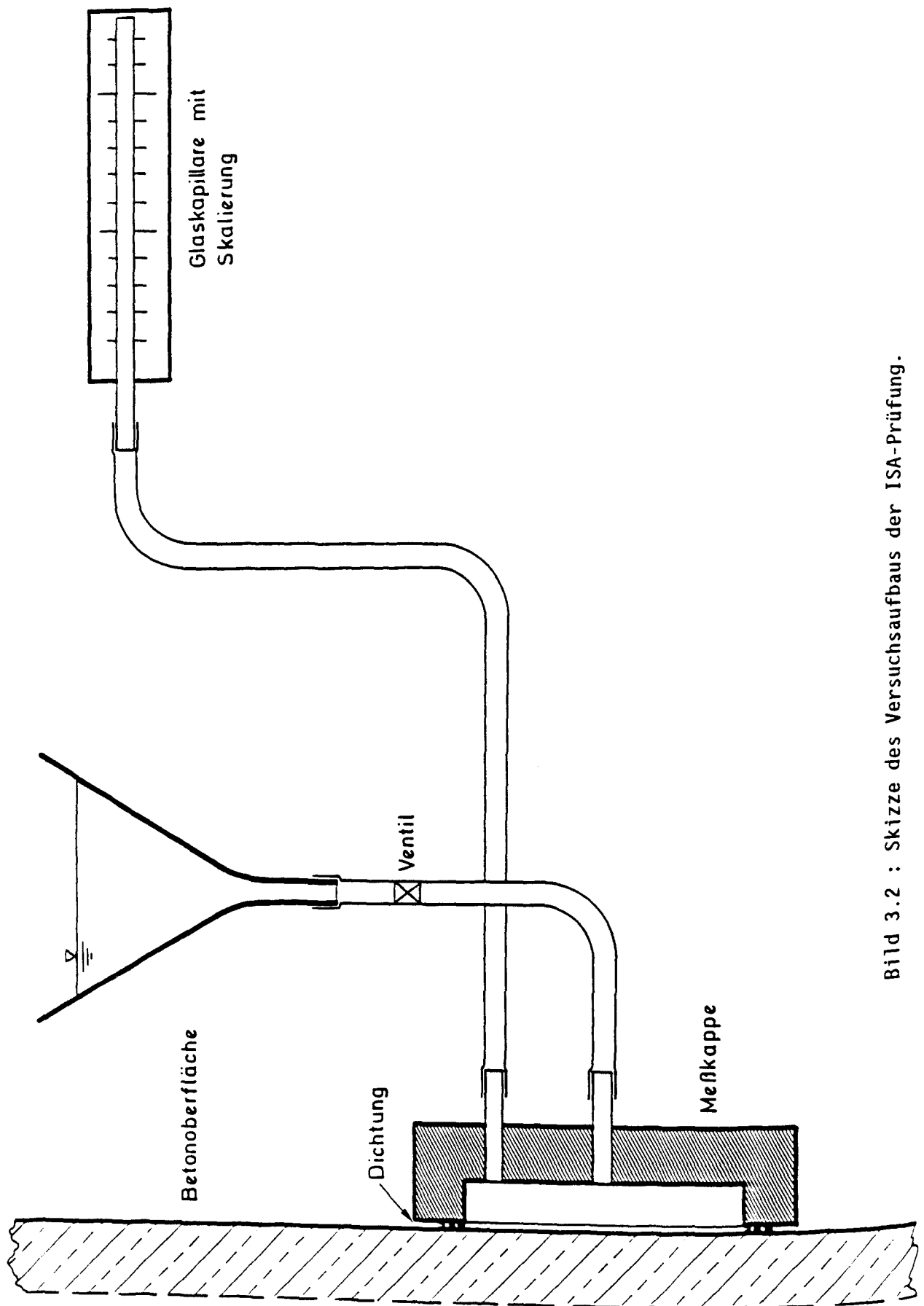


Bild 3.2 : Skizze des Versuchsaufbaus der ISA-Prüfung.

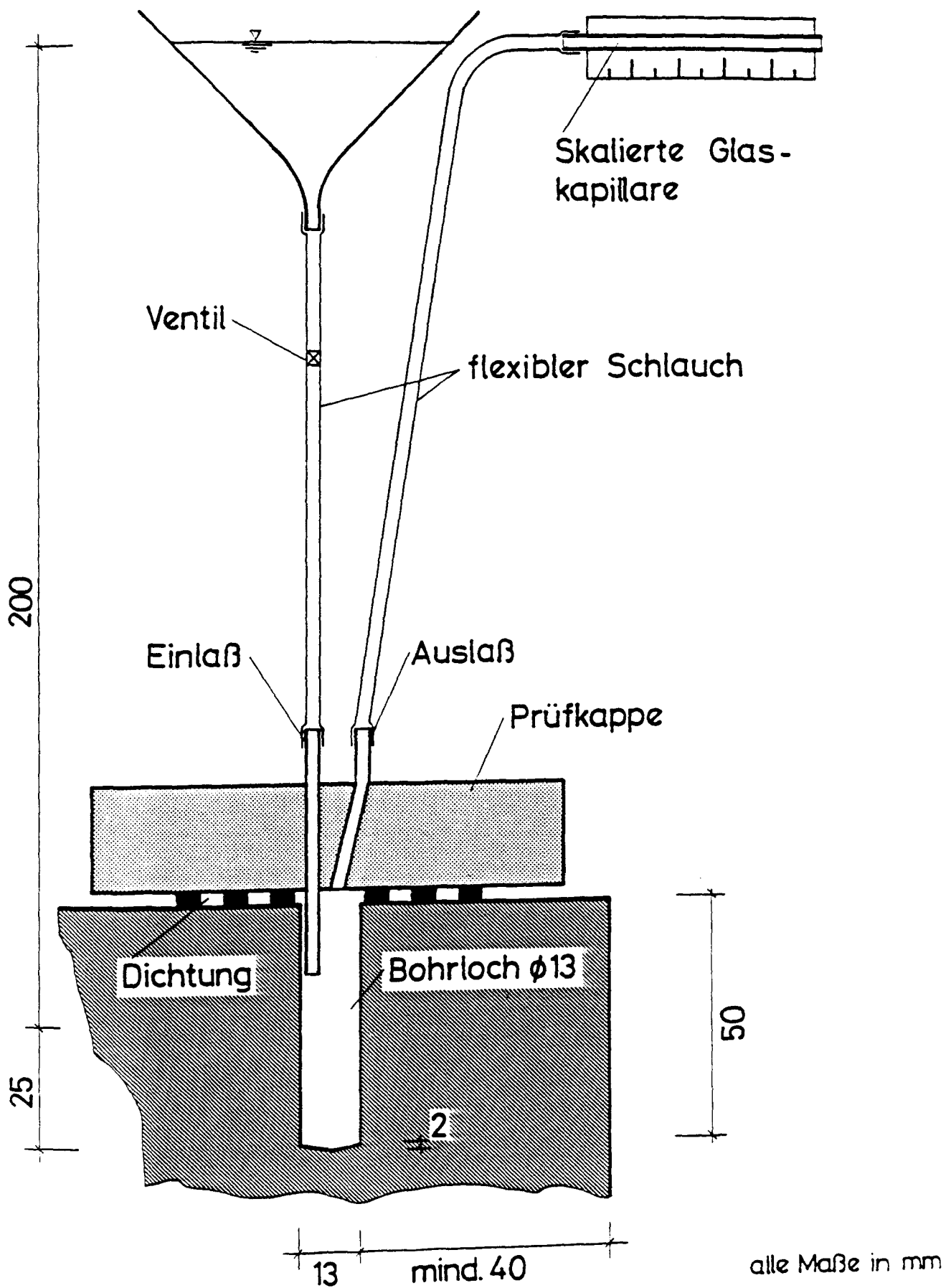


Bild 3.3 : Skizze des Versuchsaufbaus der CAT-Prüfung.

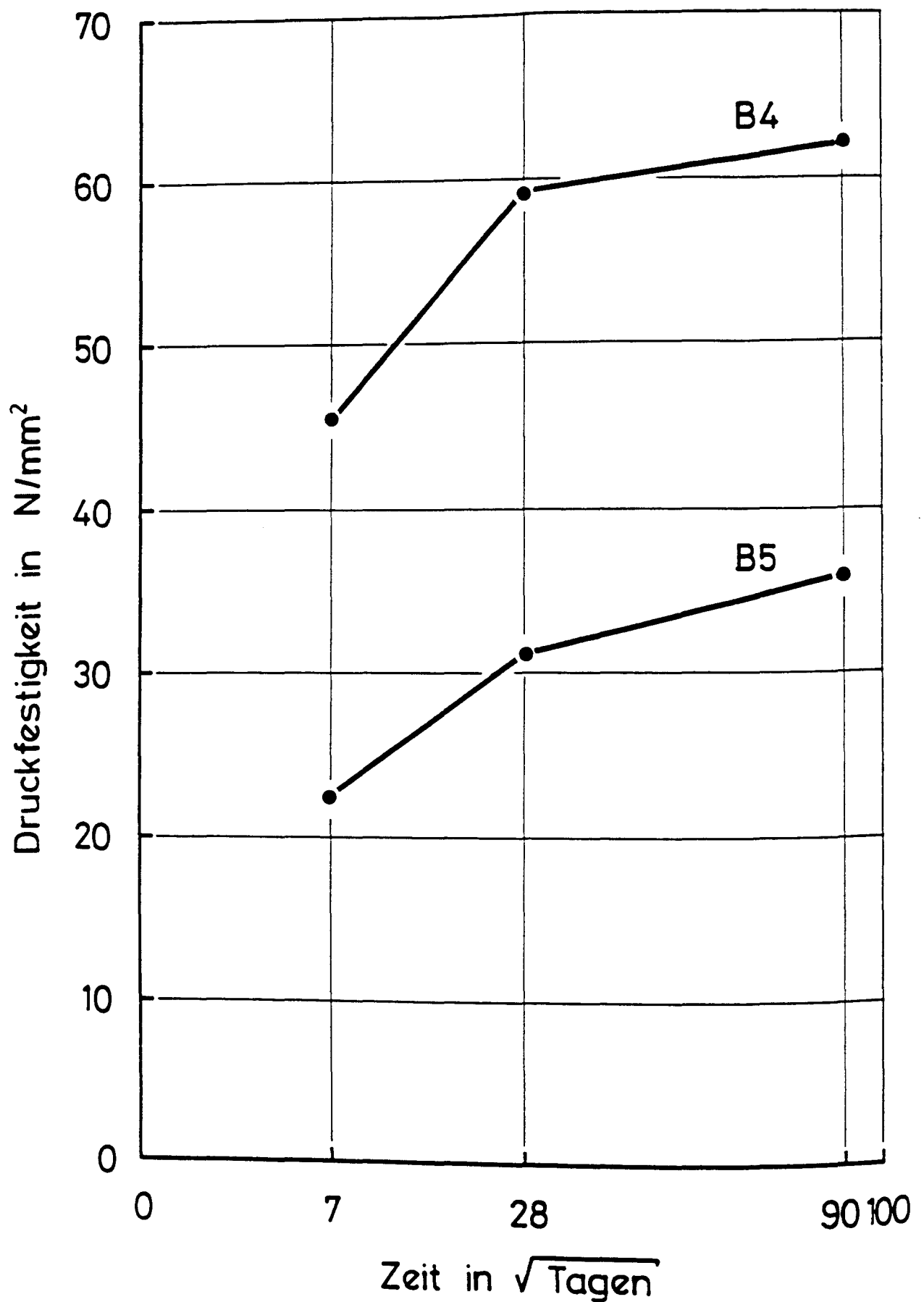


Bild 3.4 : Druckfestigkeitsentwicklung des Betons der Betonagen B4 und B5. (Lagerung der Würfel mit einer Kantenlänge von $a = 150 \text{ mm}$ nach DIN 1048)

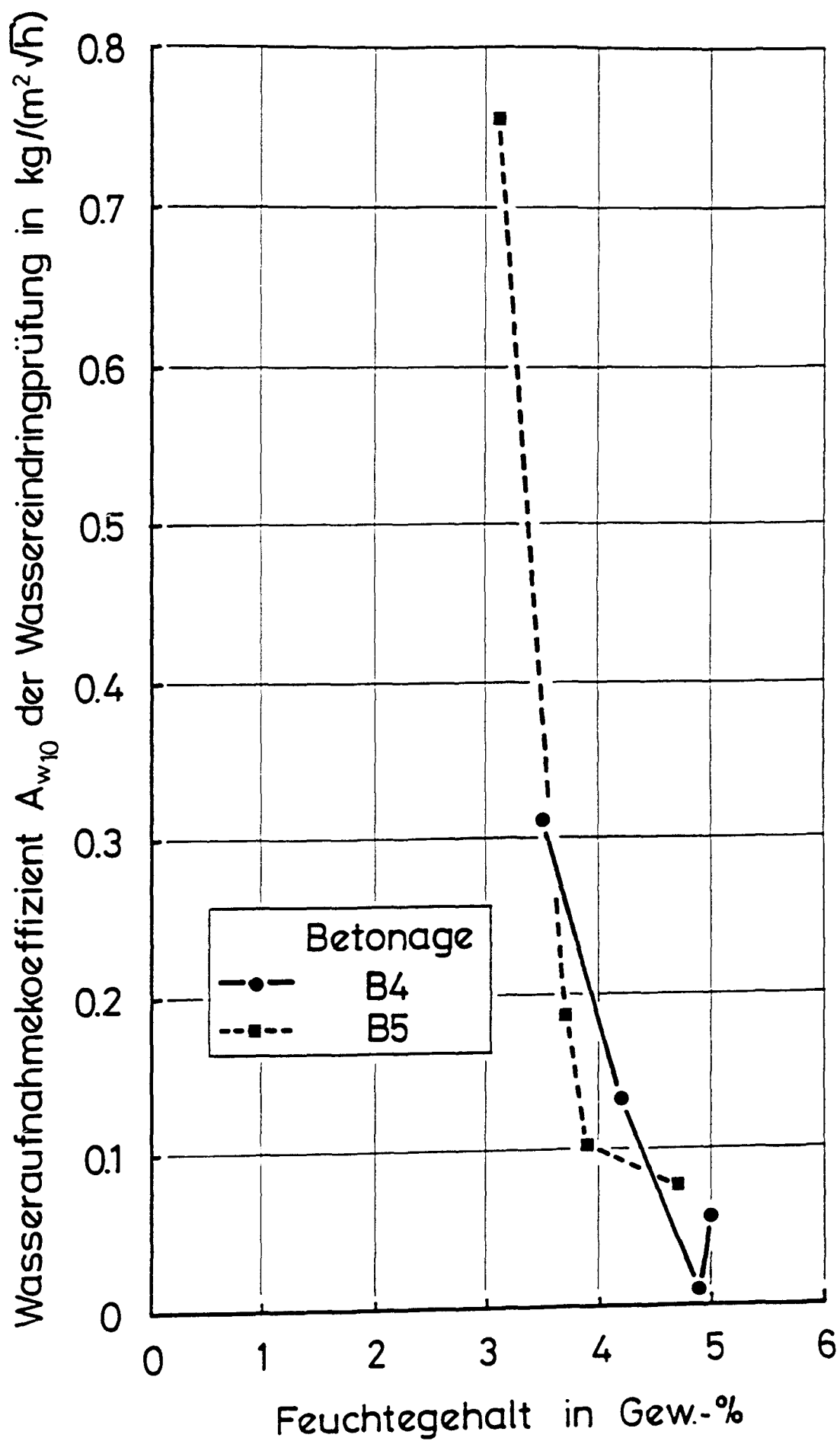


Bild 3.5 : Feuchteabhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung A_{w10} . (Betonalter ca. 360 Tage)

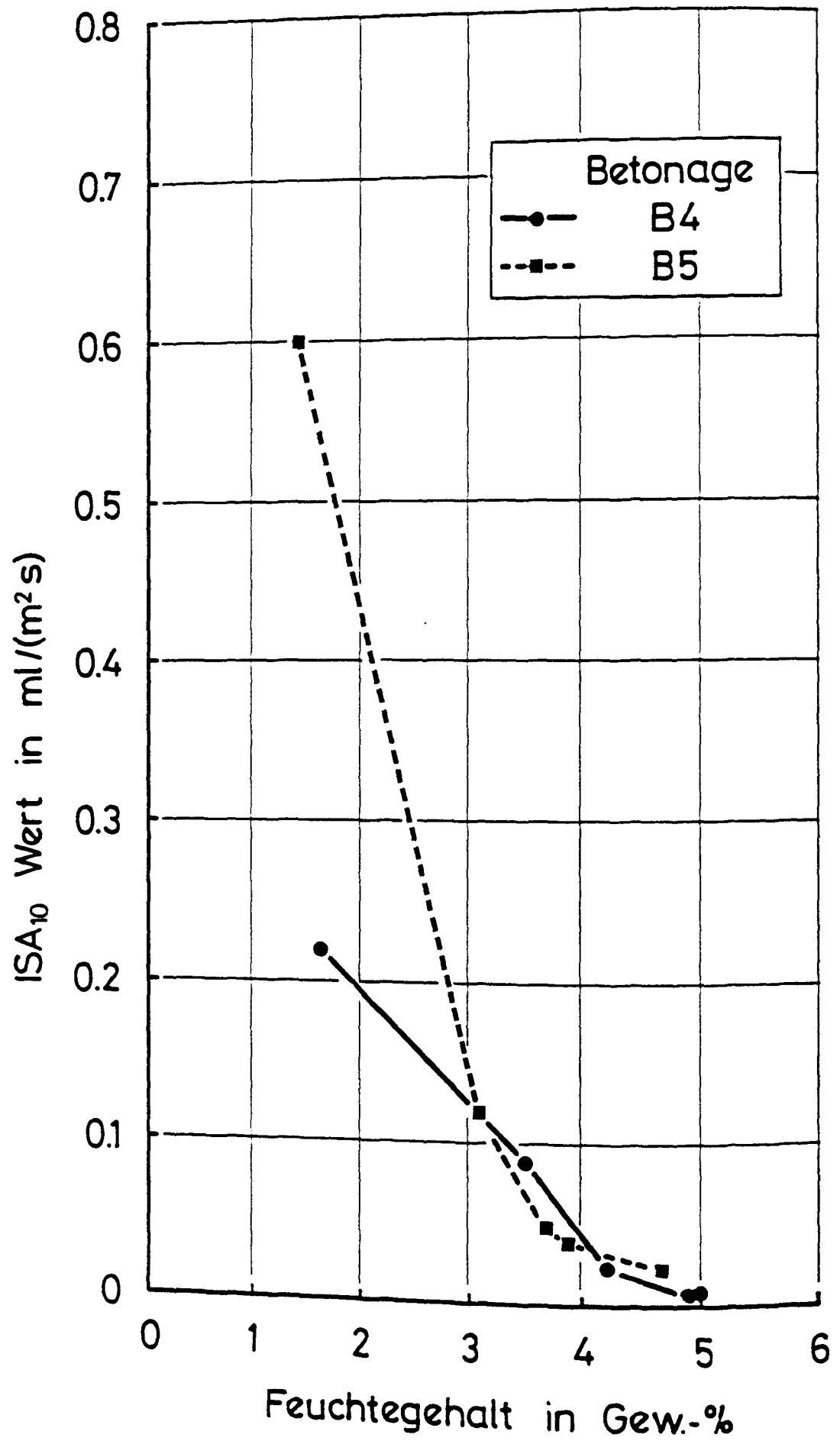


Bild 3.6 : Feuchteabhängigkeit des ISA₁₀-wertes. (Betonalter ca. 360 Tage)

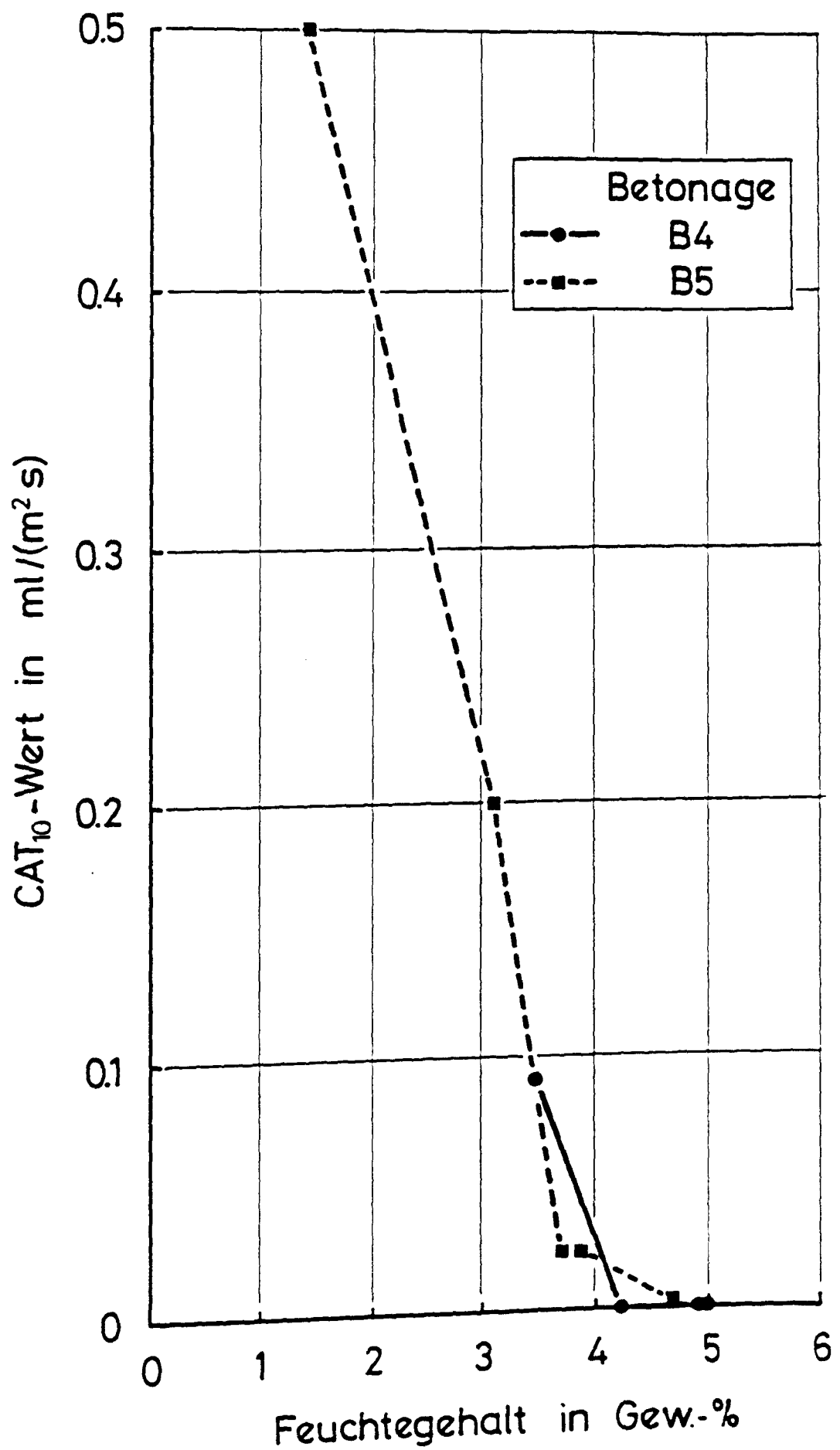


Bild 3.7 : Feuchteabhängigkeit des CAT_{10} -Wertes. (Betonalter ca. 360 Tage)

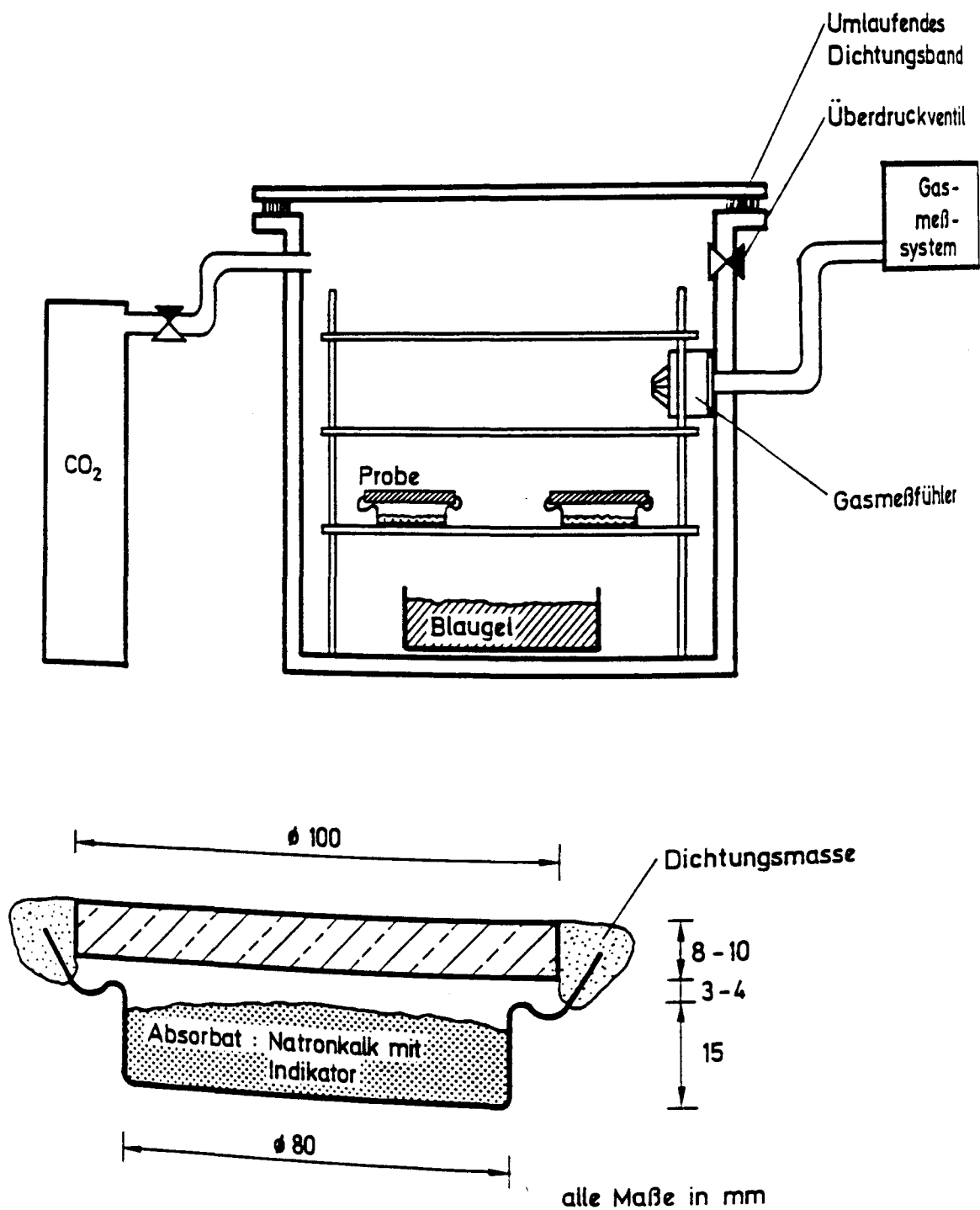


Bild 4.2.1 : Skizze der Versuchseinrichtung zur Messung des CO₂-Diffusionskoeffizienten.

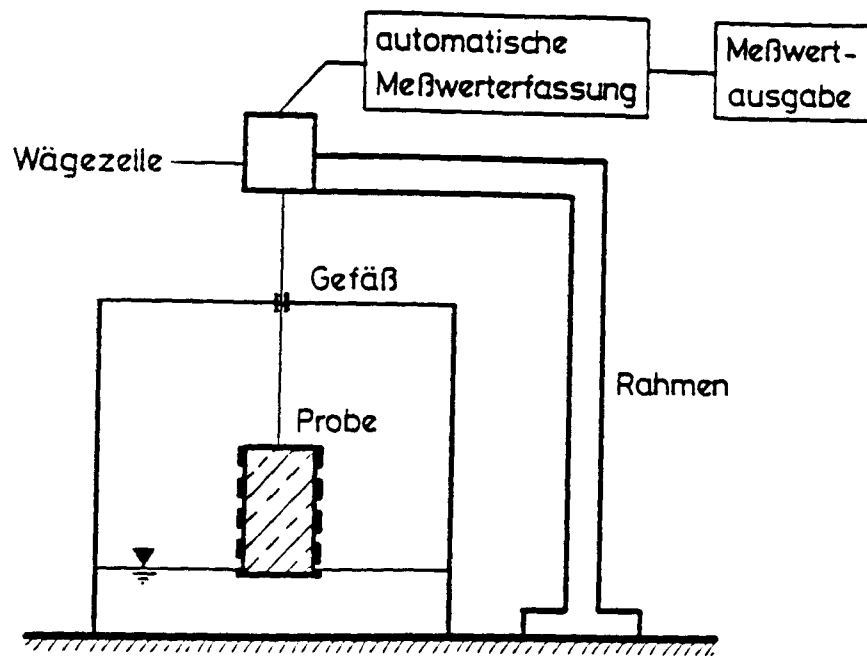
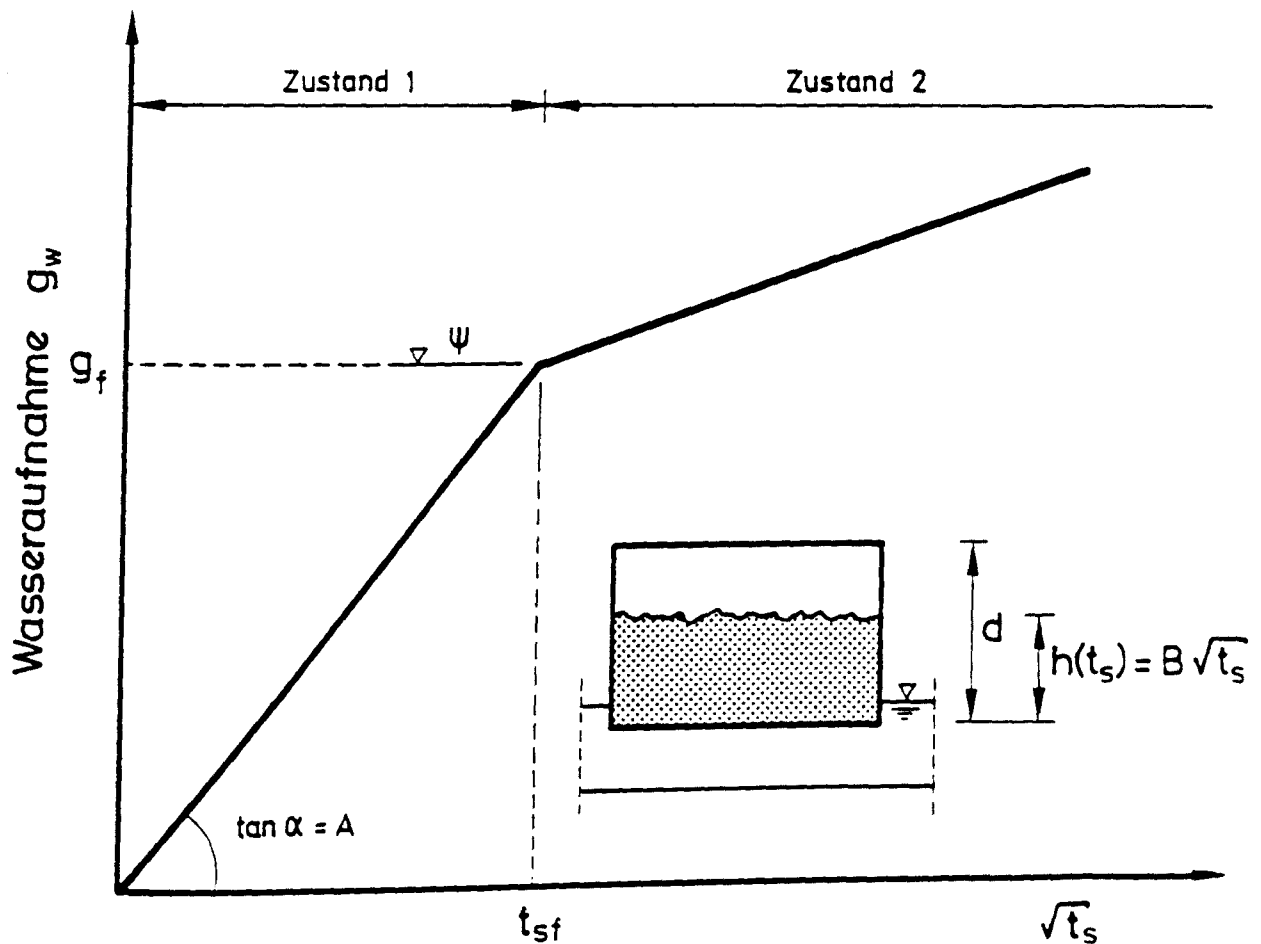


Bild 4.2.2 : Skizze der Versuchseinrichtung zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Betonproben.



A : Wasseraufnahmekoeffizient

B : Wassereindringkoeffizient

Ψ : Wasserkapazität

Bild 4.2.3 : Allgemeine Darstellung der Versuchsergebnisse der Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme quasi-homogener Baustoffe.

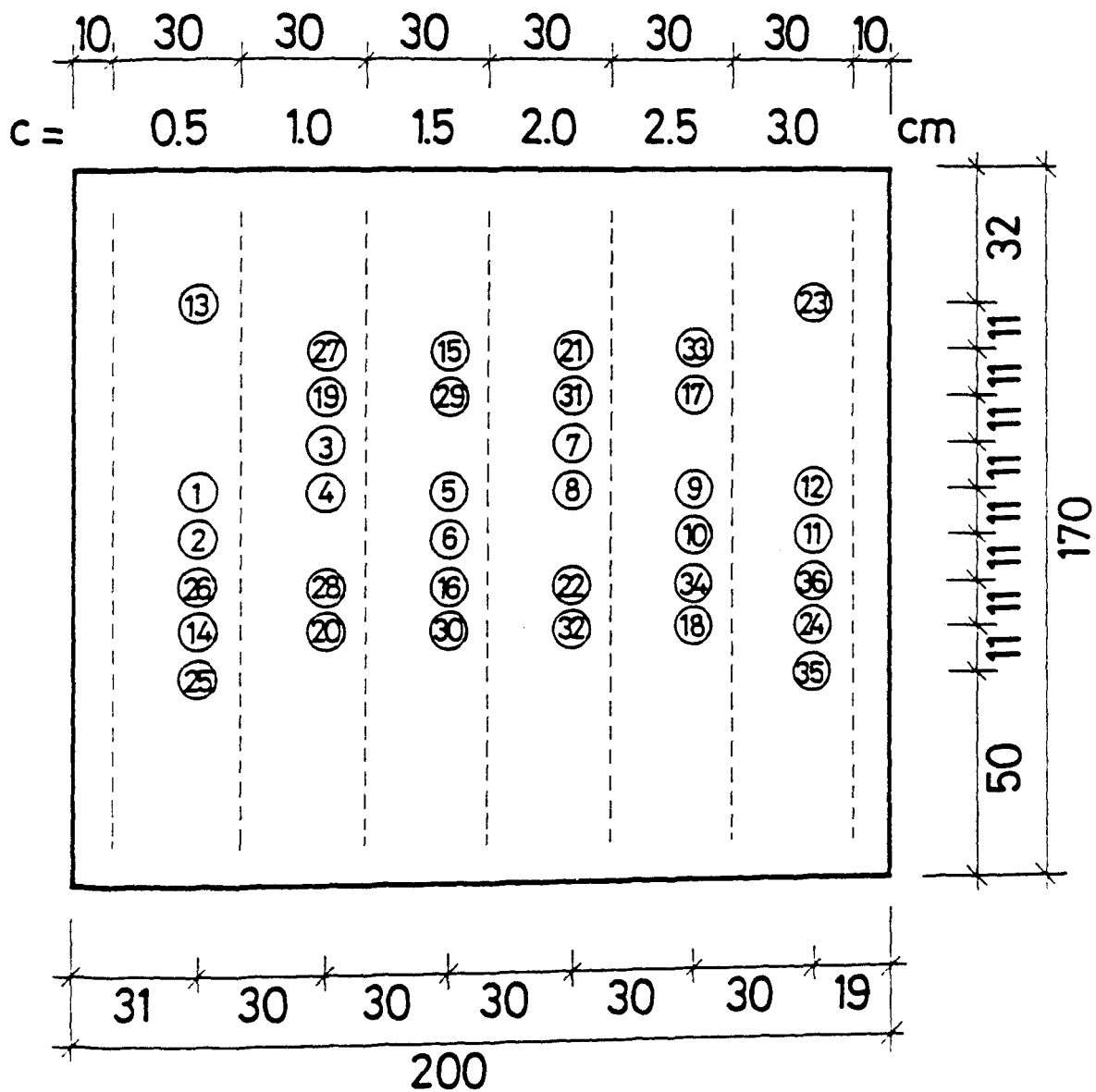


Bild 4.3.2 : Lage der Bohrkerne. (Wandansicht)

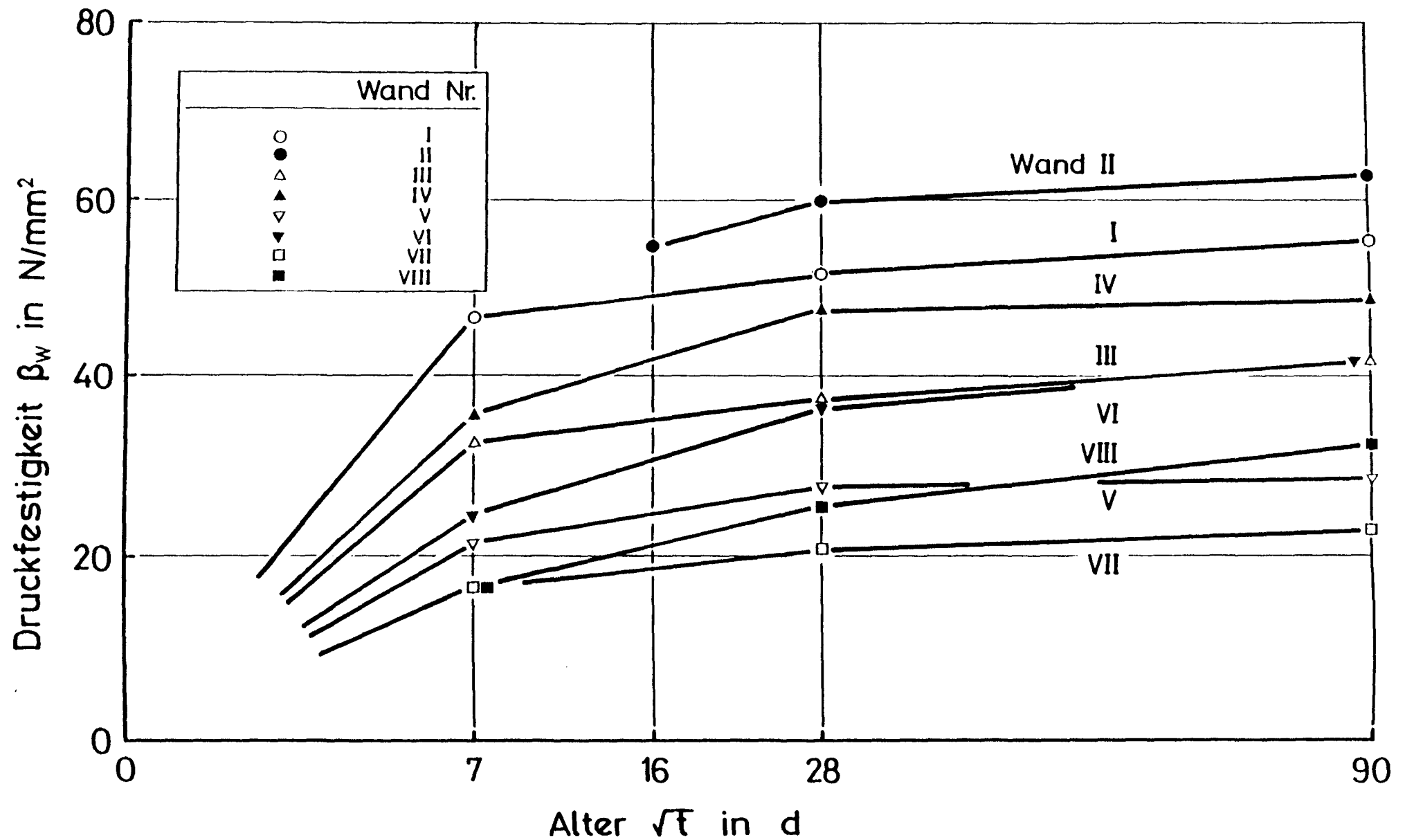
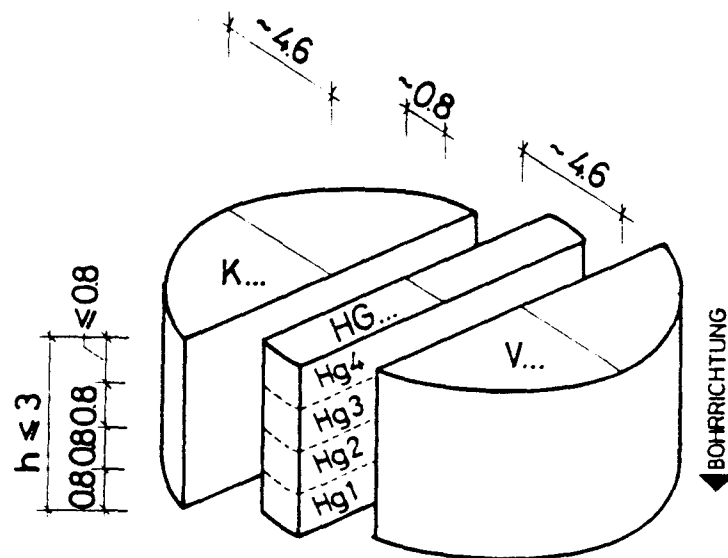


Bild 4.3.3 : Druckfestigkeitsentwicklung der Erhärtungswürfel. (Kantenlänge $a = 150 \text{ mm}$)



Aufteilung der Stücke mit römischer Ziffer

Bohrkern-nummer	Schneideskizze und Bezeichnung	Bohrkern-nummer	Schneideskizze und Bezeichnung
1 (28d) 25 (360d)		4 (28d) 28 (360d)	
2 (28d) 26 (360d)		5 (28d) 29 (360d)	
3 (28d) 27 (360d)		6 (28d) 30 (360d)	

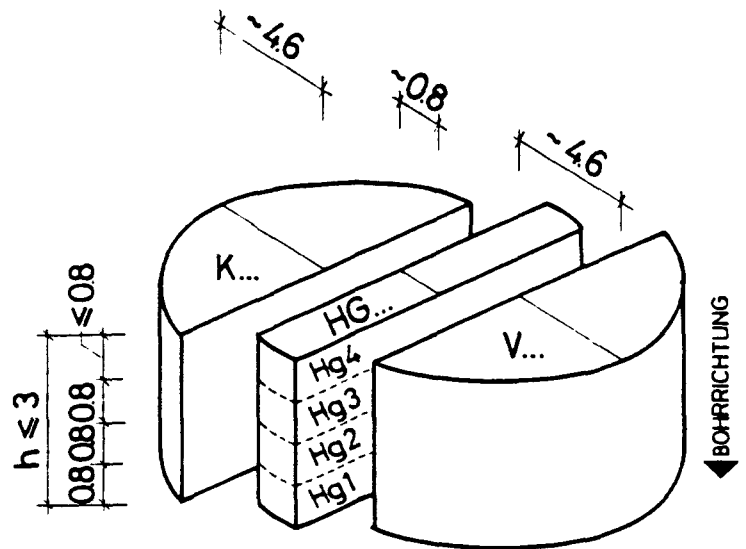
2 3 3 0^8 2 — Länge der Teile



D3 — Aufteilung der Teilstücke mit röm. Ziffer siehe Skizze oben
Bewehrung — Kennbezeichnung für beab-sichtigte Prüfung:

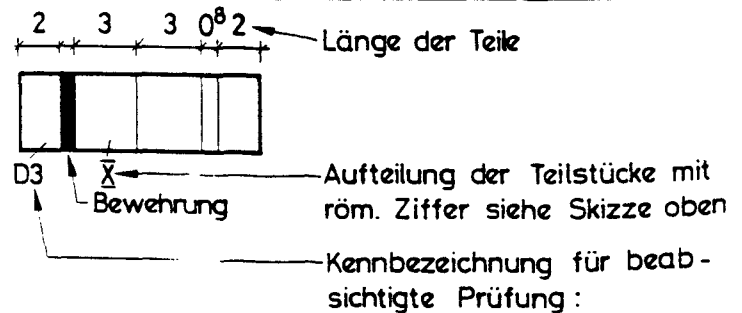
D... : CO₂-Diffusionsversuche
K... : Kapillarer Wassertransport
V... : Porosität (Vakuumsättigung)
Hg... : Quecksilberdruckporosimetrie

Bild 4.4.1 : Sägeplan für die zum Betonalter 28 und 360 Tage entnommenen Bohrkerne. (1. Hälfte)



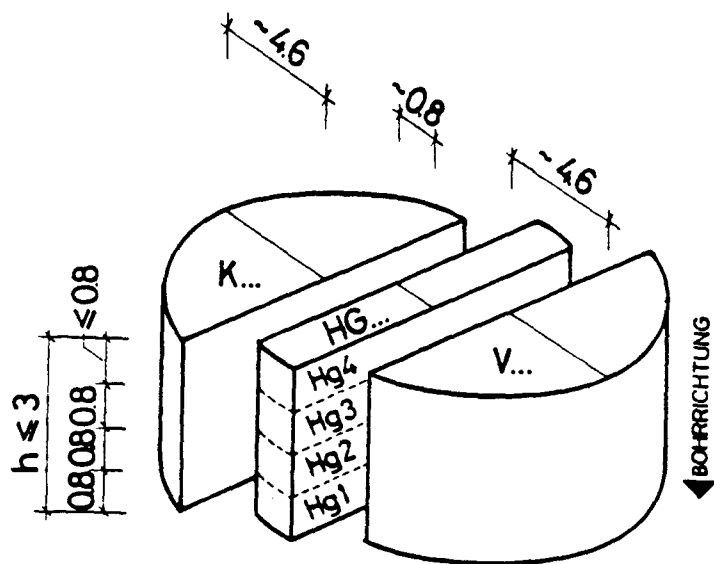
Aufteilung der Stücke mit römischer Ziffer

Bohrkern-nummer	Schneideskizze und Bezeichnung	Bohrkern-nummer	Schneideskizze und Bezeichnung
7 (28d) 31 (360d)		10 (28d) 34 (360d)	
8 (28d) 32 (360d)		11 (28d) 35 (360d)	
9 (28d) 33 (360d)		12 (28d) 36 (360d)	



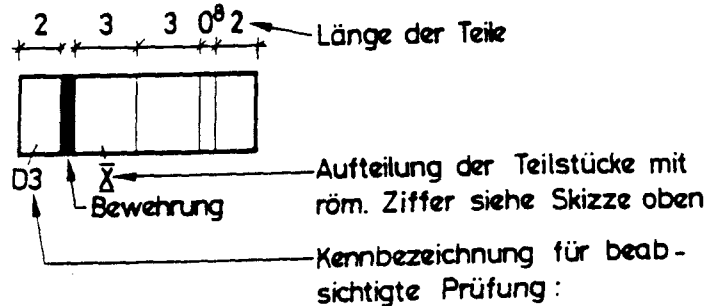
D... : CO₂-Diffusionsversuche
 K... : Kapillarer Wassertransport
 V... : Porosität (Vakuumsättigung)
 Hg...: Quecksilberdruckporosimetrie

Bild 4.4.2 : Sägeplan für die zum Betonalter 28 und 360 Tage entnommenen Bohrkerne. (2. Hälfte)



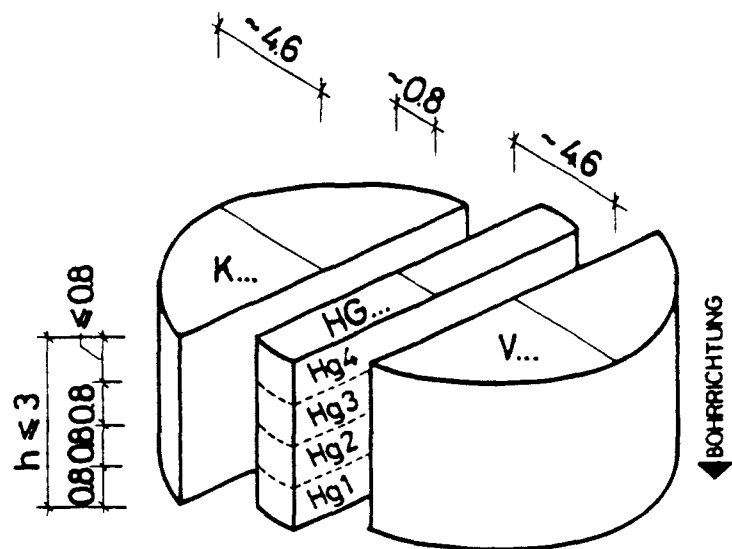
Aufteilung der Stücke mit römischer Ziffer

Bohrkern-nummer	Schneideskizze und Bezeichnung	Bohrkern-nummer	Schneideskizze und Bezeichnung
13 (90d)		16 (90d)	
14 (90d)		17 (90d)	
15 (90d)		18 (90d)	



D... : CO₂-Diffusionsversuche
 K... : Kapillarer Wassertransport
 V... : Porosität (Vakuumsättigung)
 Hg... : Quecksilberdruckporosimetrie

Bild 4.4.3 : Sägeplan für die zum Betonalter 90 Tage entnommenen Bohrkerne.



Aufteilung der Stücke mit römischer Ziffer

Bohrkern-nummer	Schneideskizze und Bezeichnung	Bohrkern-nummer	Schneideskizze und Bezeichnung
19 (180d)		22 (180d)	
20 (180d)		23 (180d)	
21 (180d)		24 (180d)	

2 3 3 0^8 2 → Länge der Teile



D3 → Bewehrung
 Aufteilung der Teilstücke mit röm. Ziffer siehe Skizze oben
 Kennbezeichnung für beabsichtigte Prüfung:

D... : CO₂-Diffusionsversuche
 K... : Kapillarer Wassertransport
 V... : Porosität (Vakuumsättigung)
 Hg...: Quecksilberdruckporosimetrie

Bild 4.4.4 : Sägeplan für die zum Betonalter 180 Tage entnommenen Bohrkerne.

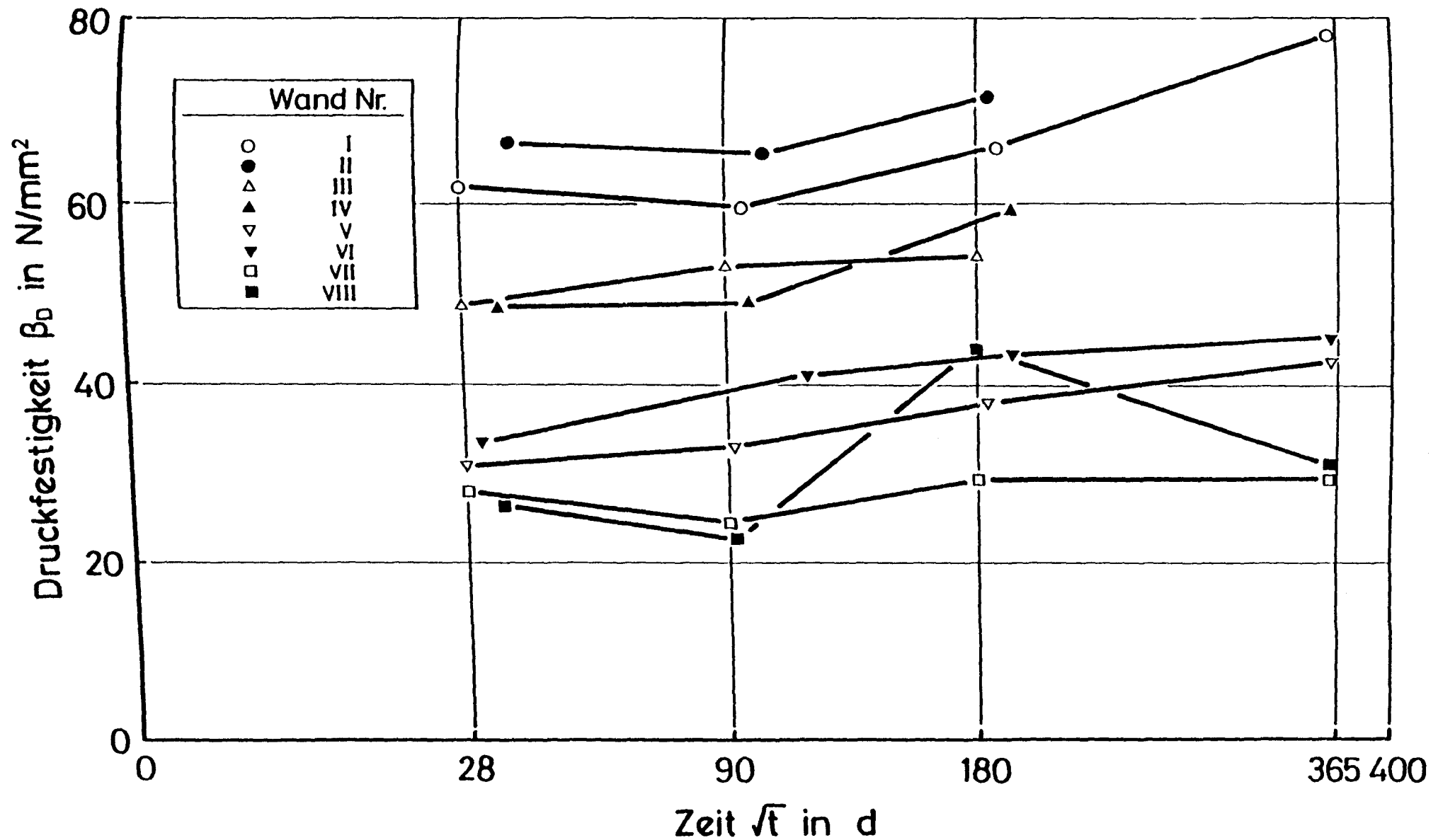


Bild 4.5.1 : Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit. (Bohrkernabschnitte $\varnothing = 100$ mm; $h = 45-70$ mm)

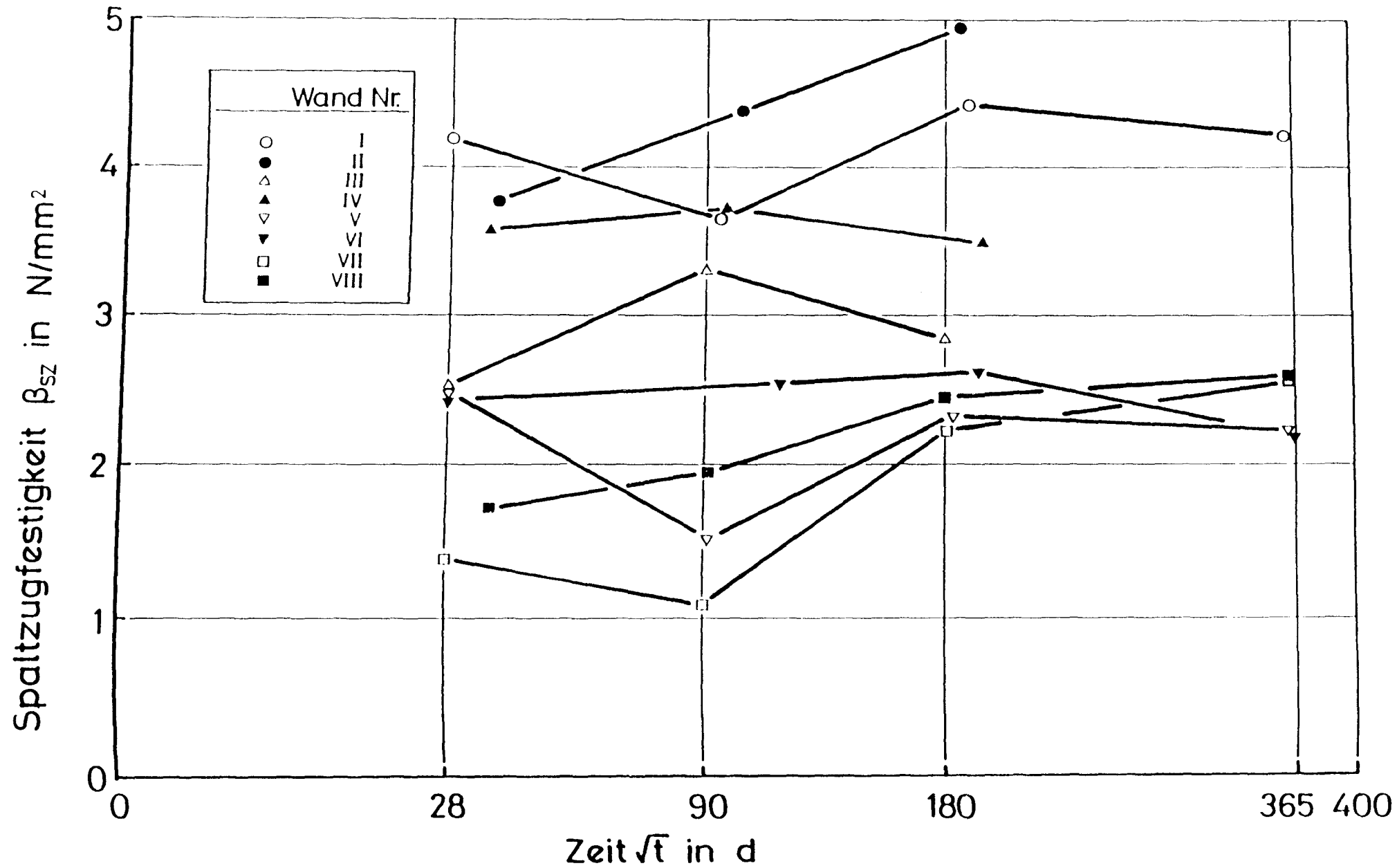


Bild 4.5.2 : Zeitliche Entwicklung der Spaltzugfestigkeit. (Bohrkernabschnitte $\varnothing = 100$ mm; $h = 45-70$ mm)

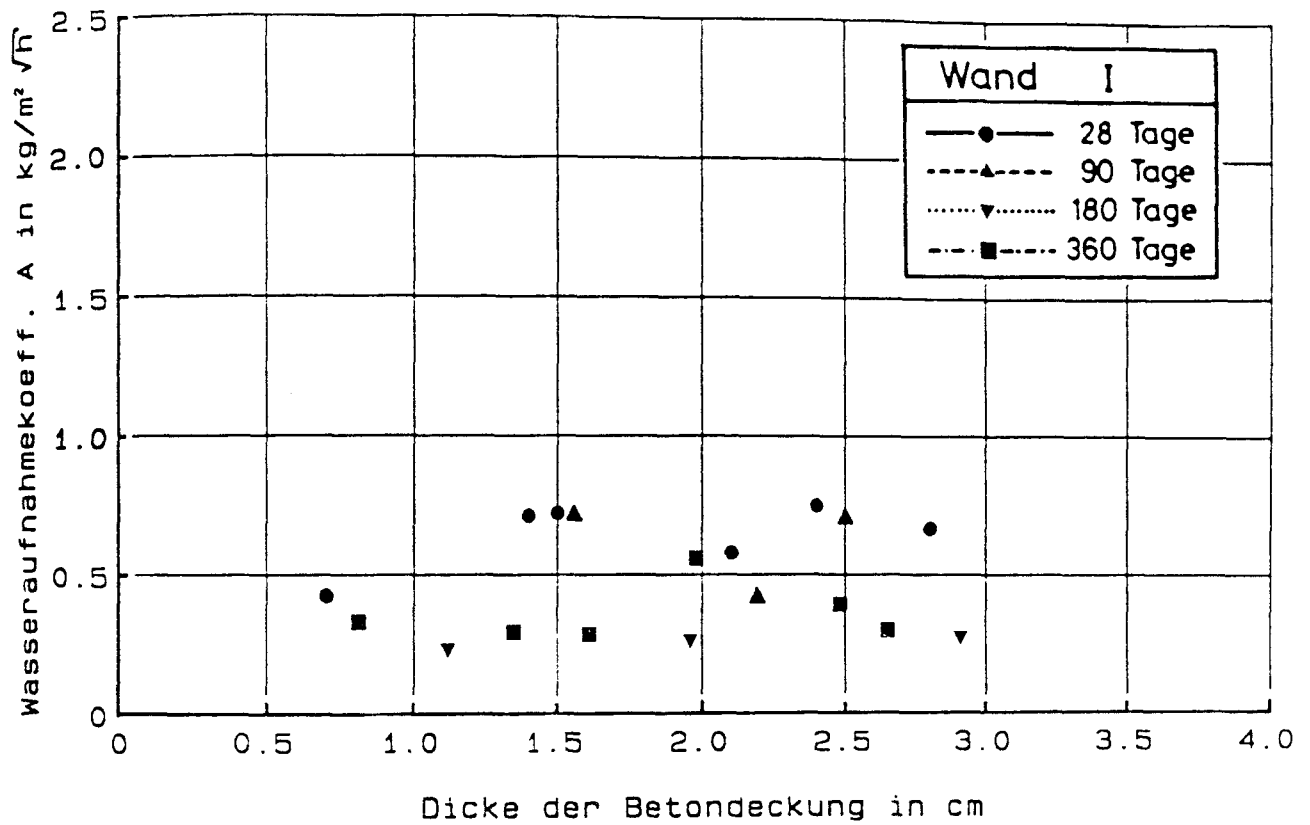


Bild 4.6.1 : Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand I.

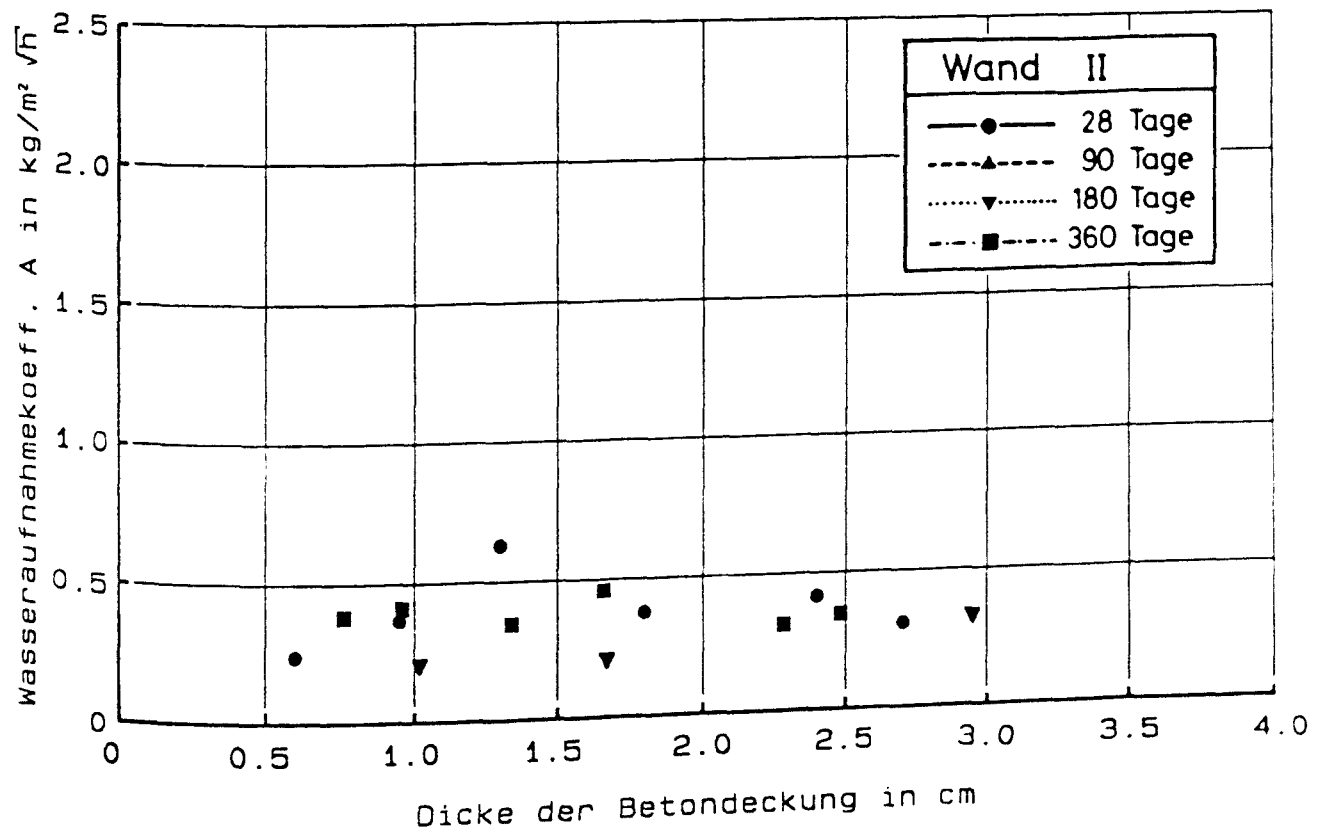


Bild 4.6.2 : Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand II.

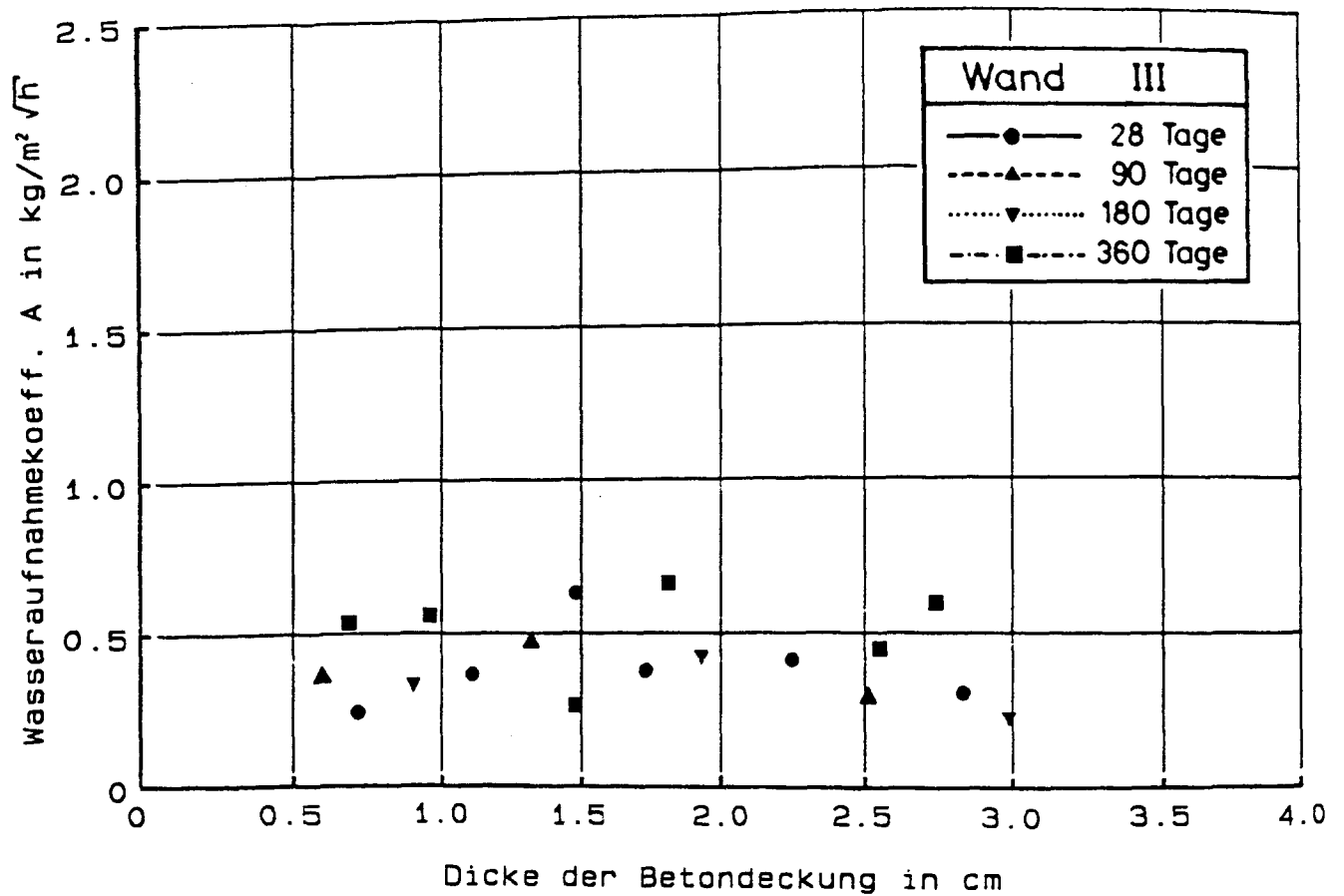


Bild 4.6.3 : Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand III.

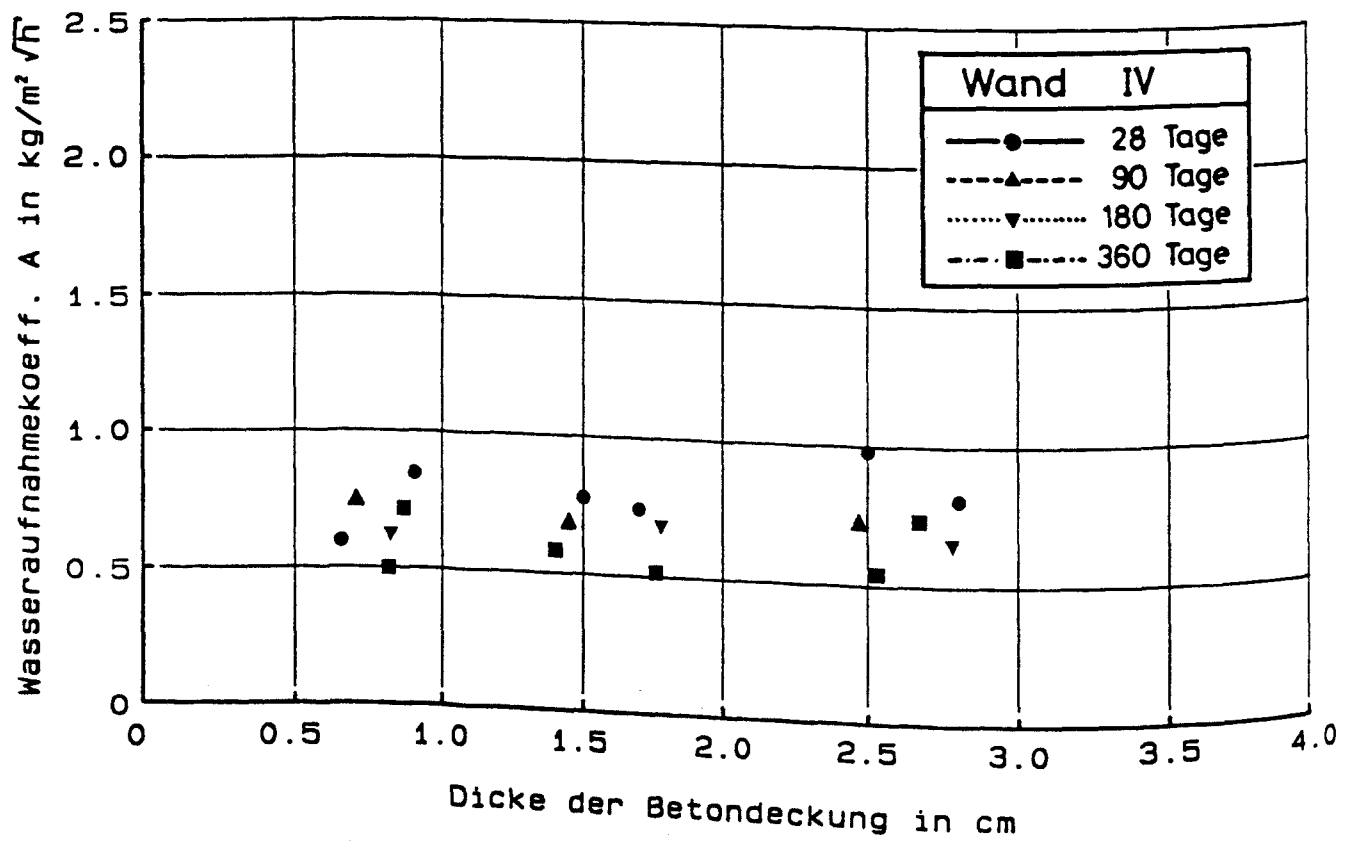


Bild 4.6.4 : Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand IV.

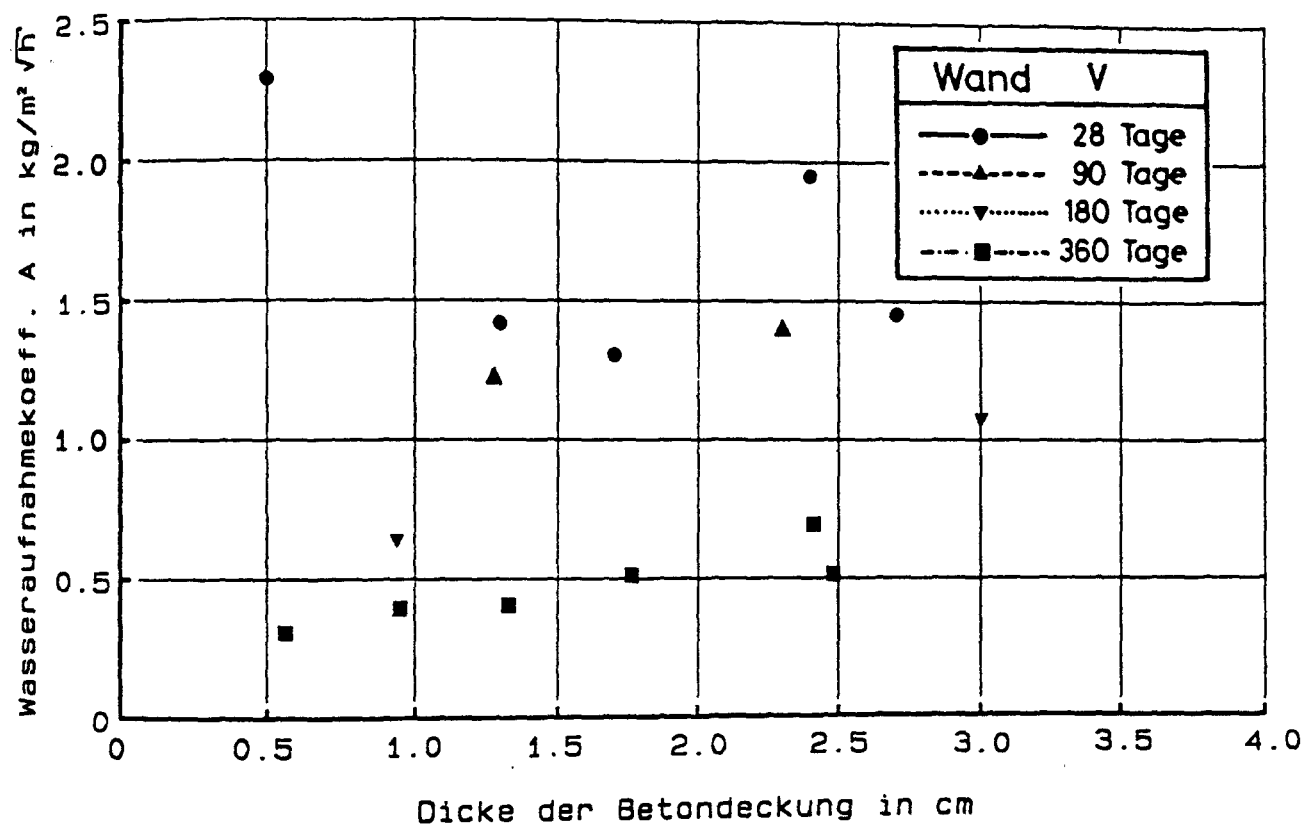


Bild 4.6.5 : Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand V.

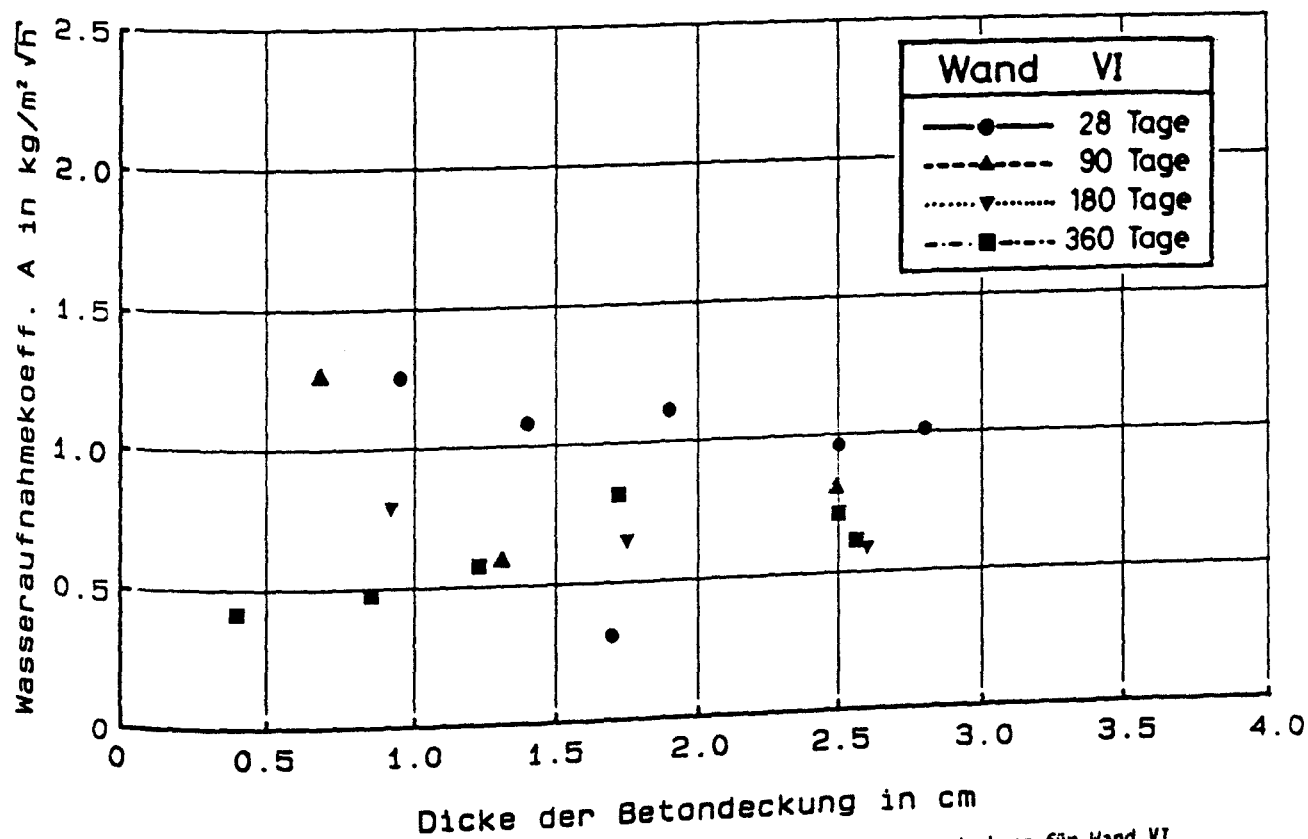


Bild 4.6.6 : Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand VI.

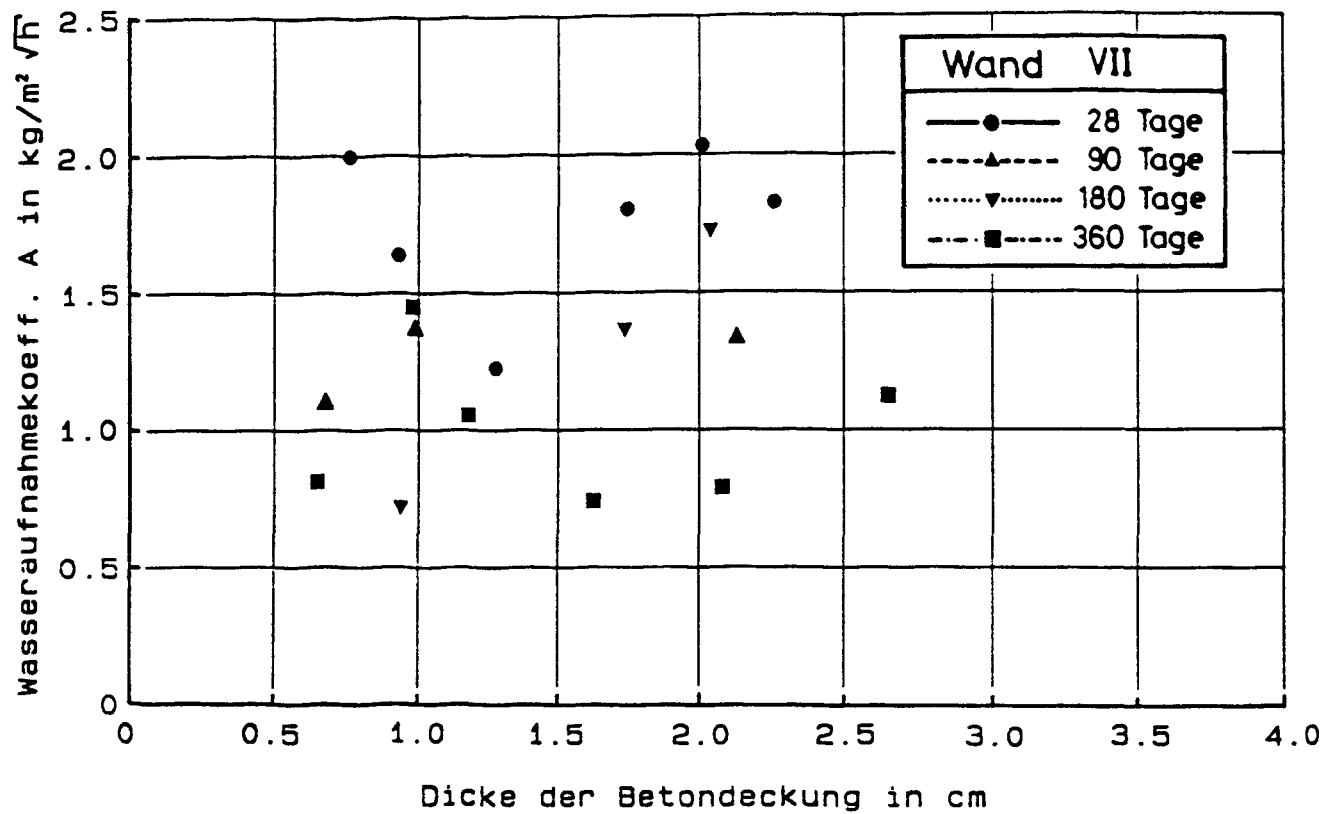


Bild 4.6.7 : Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand VII.

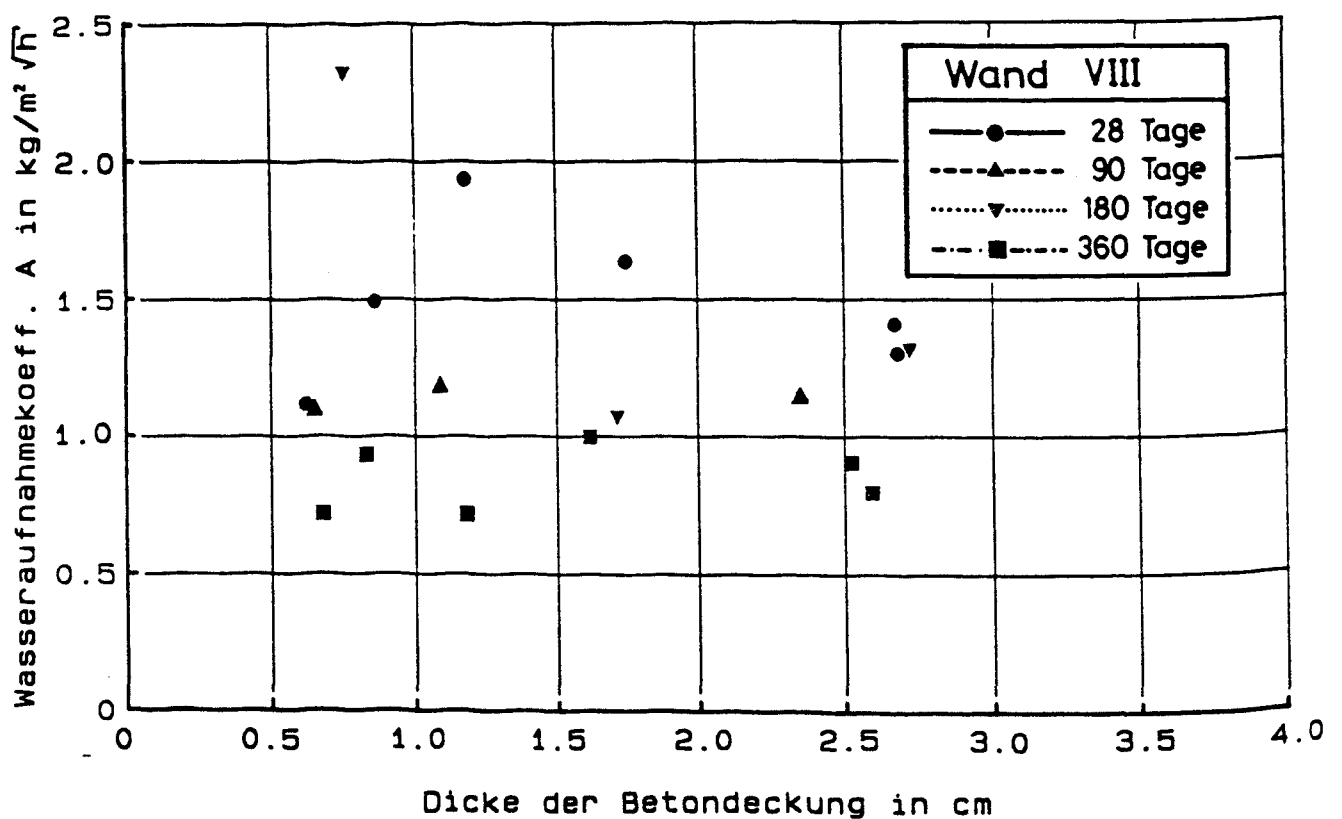


Bild 4.6.8 : Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand VIII.

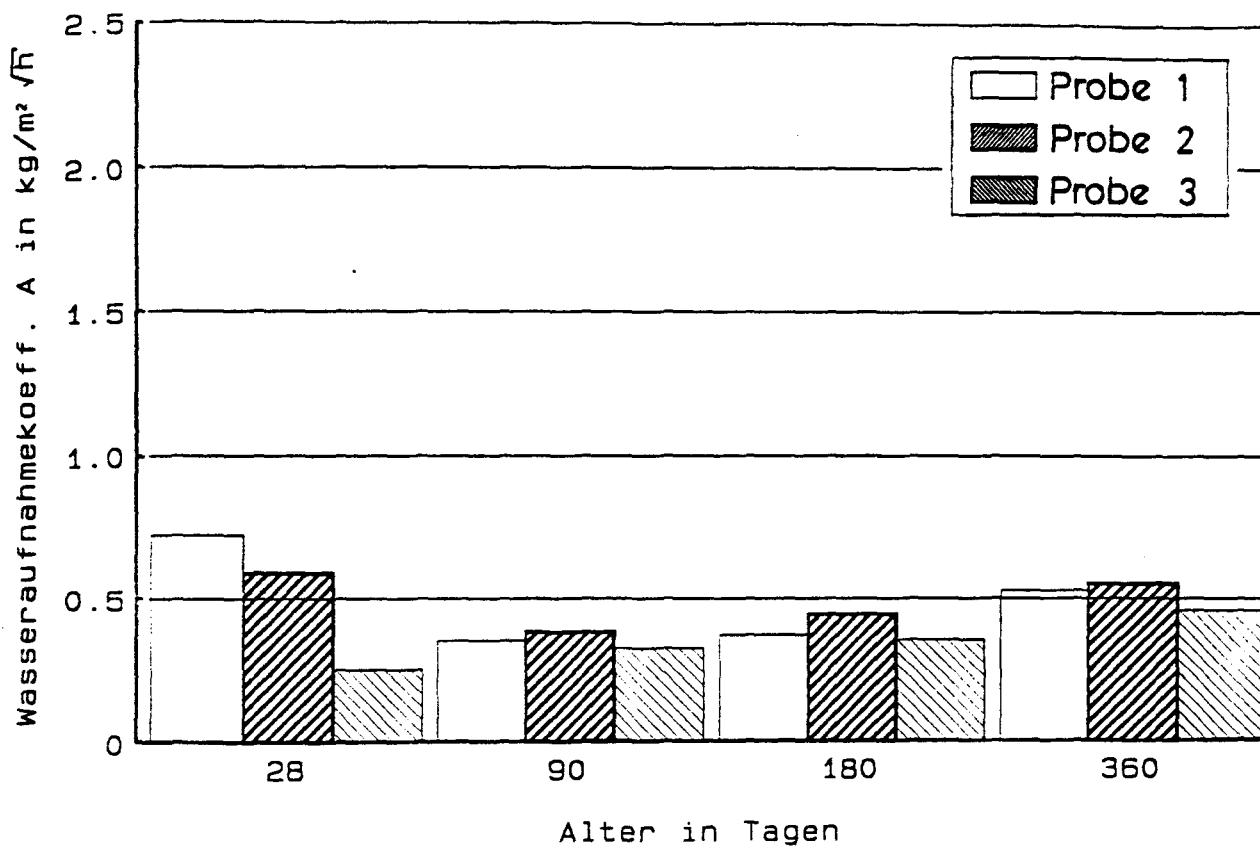


Bild 4.6.9 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand I. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

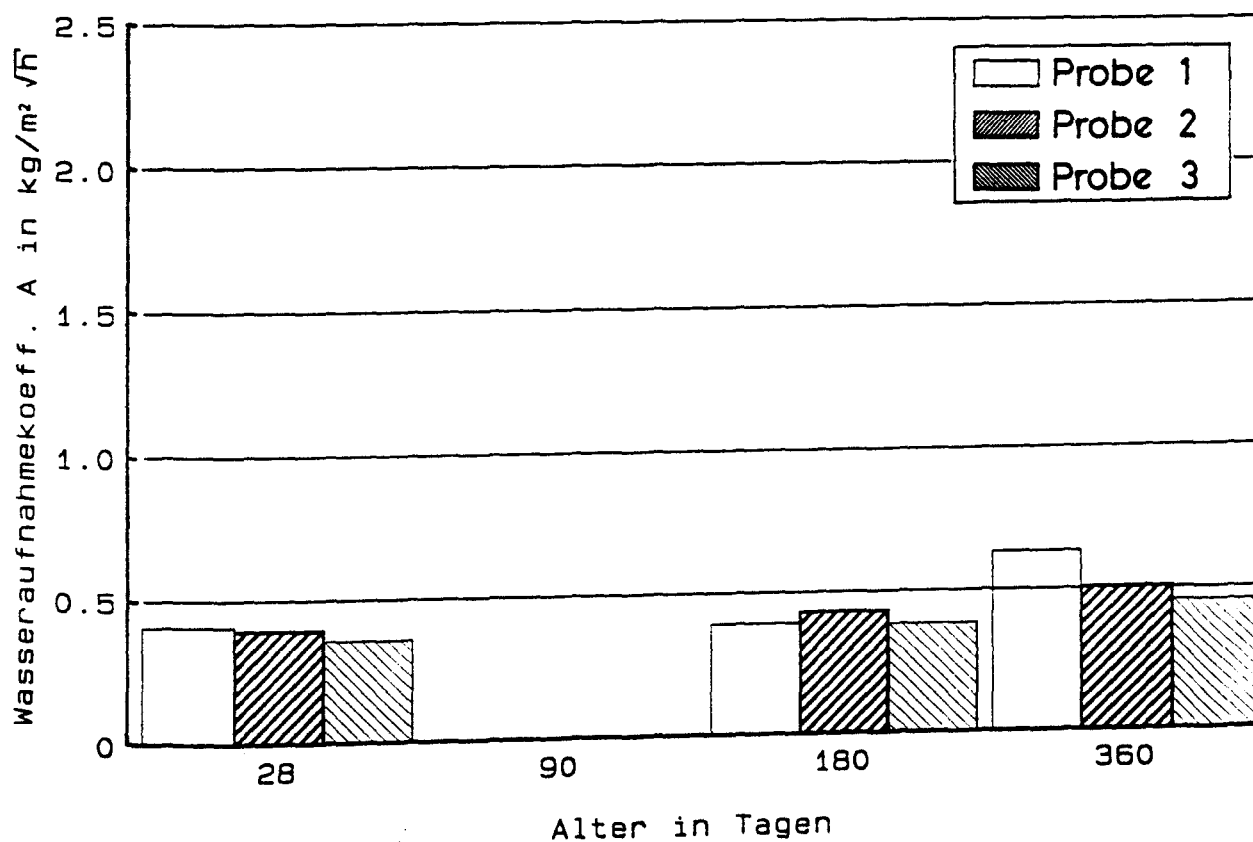


Bild 4.6.10 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand II. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

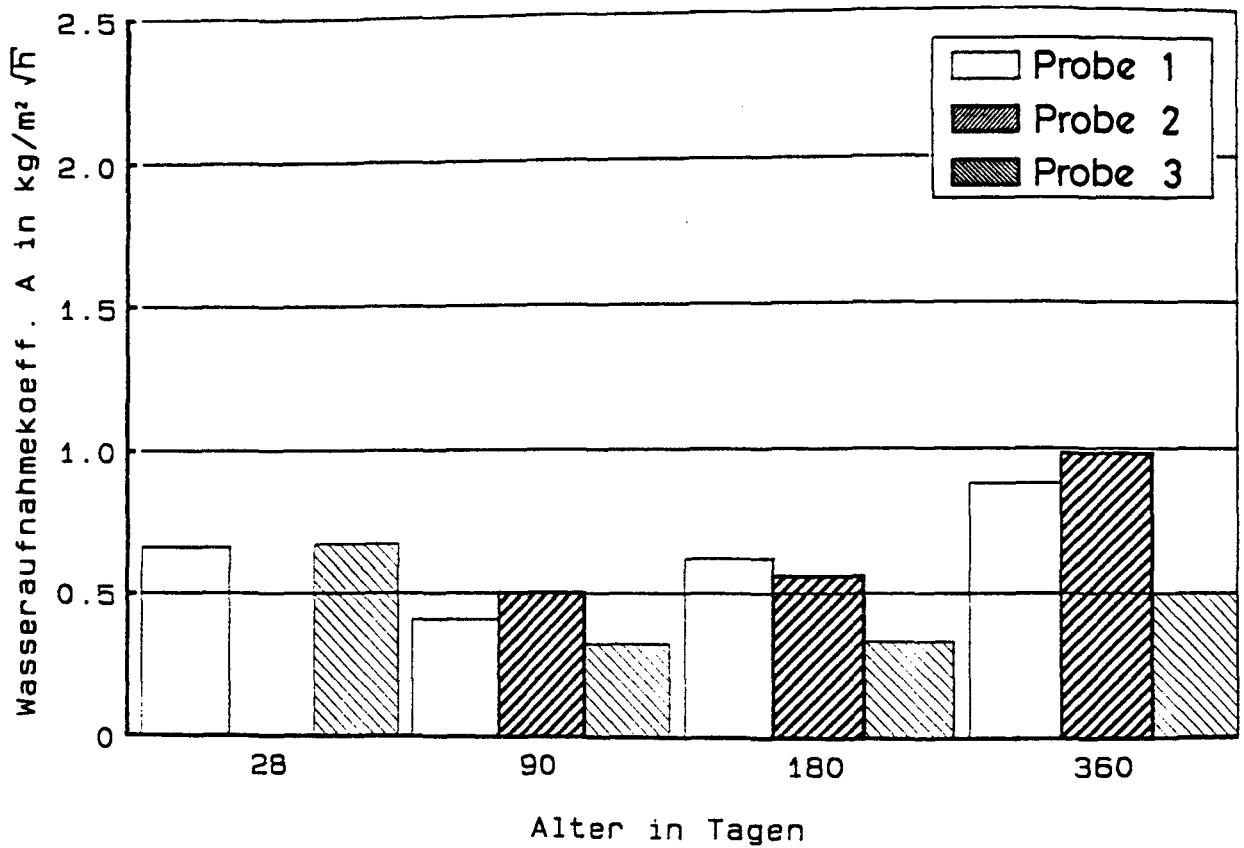


Bild 4.6.11 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand III. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

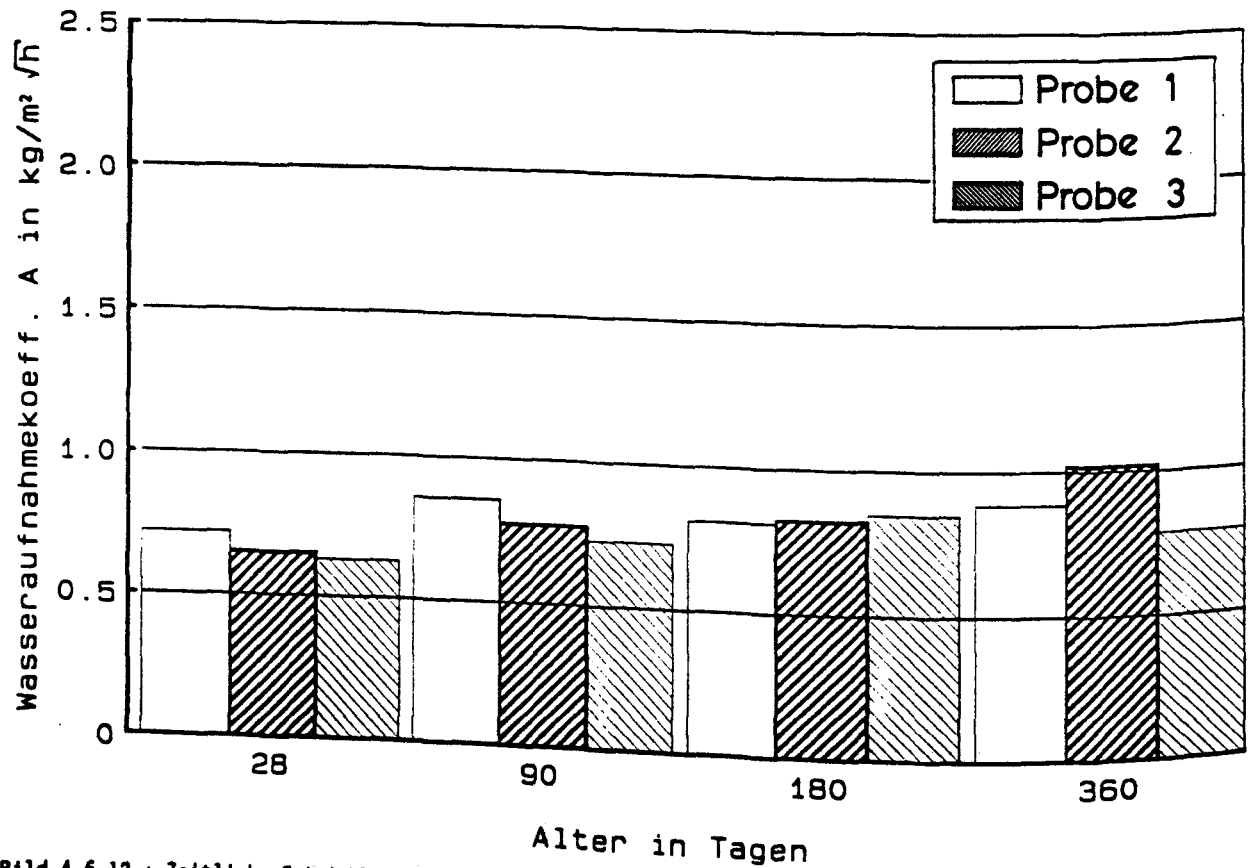


Bild 4.6.12 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand IV. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

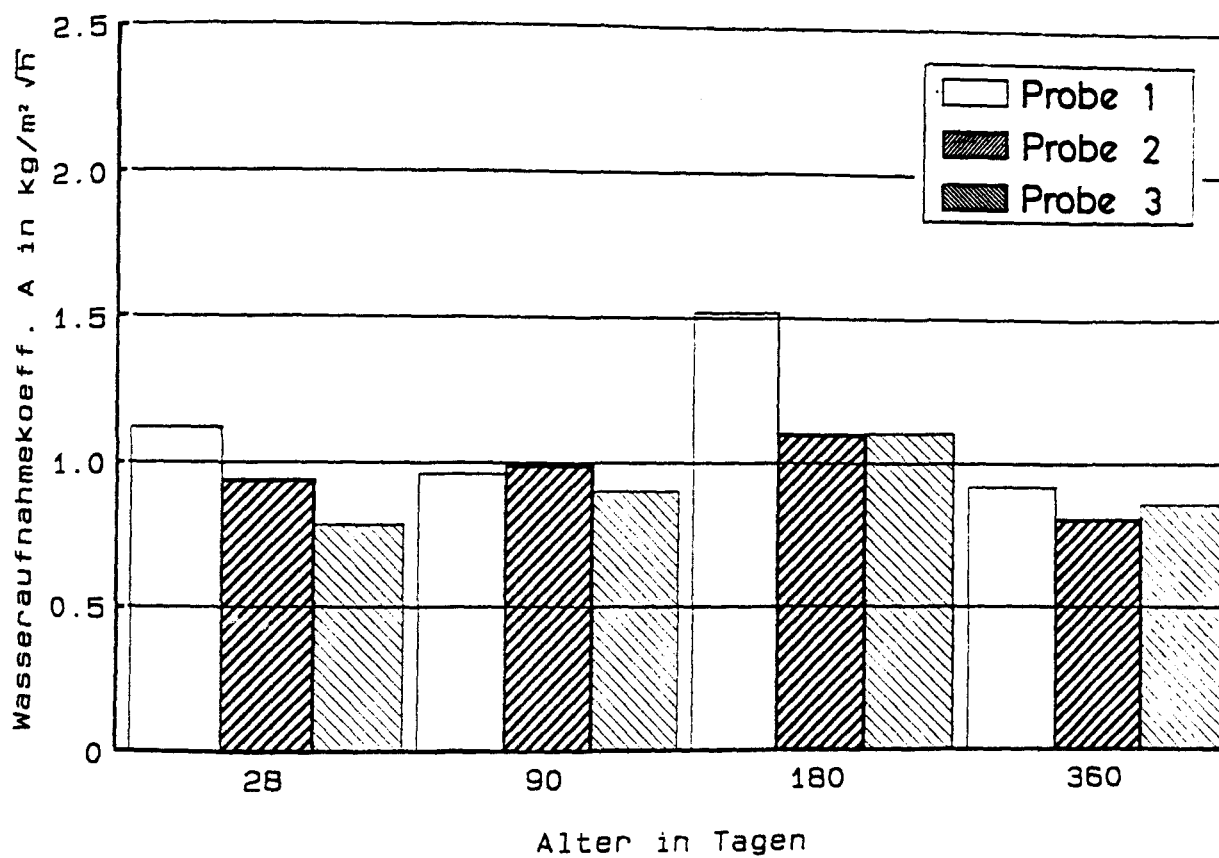


Bild 4.6.13 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand V. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

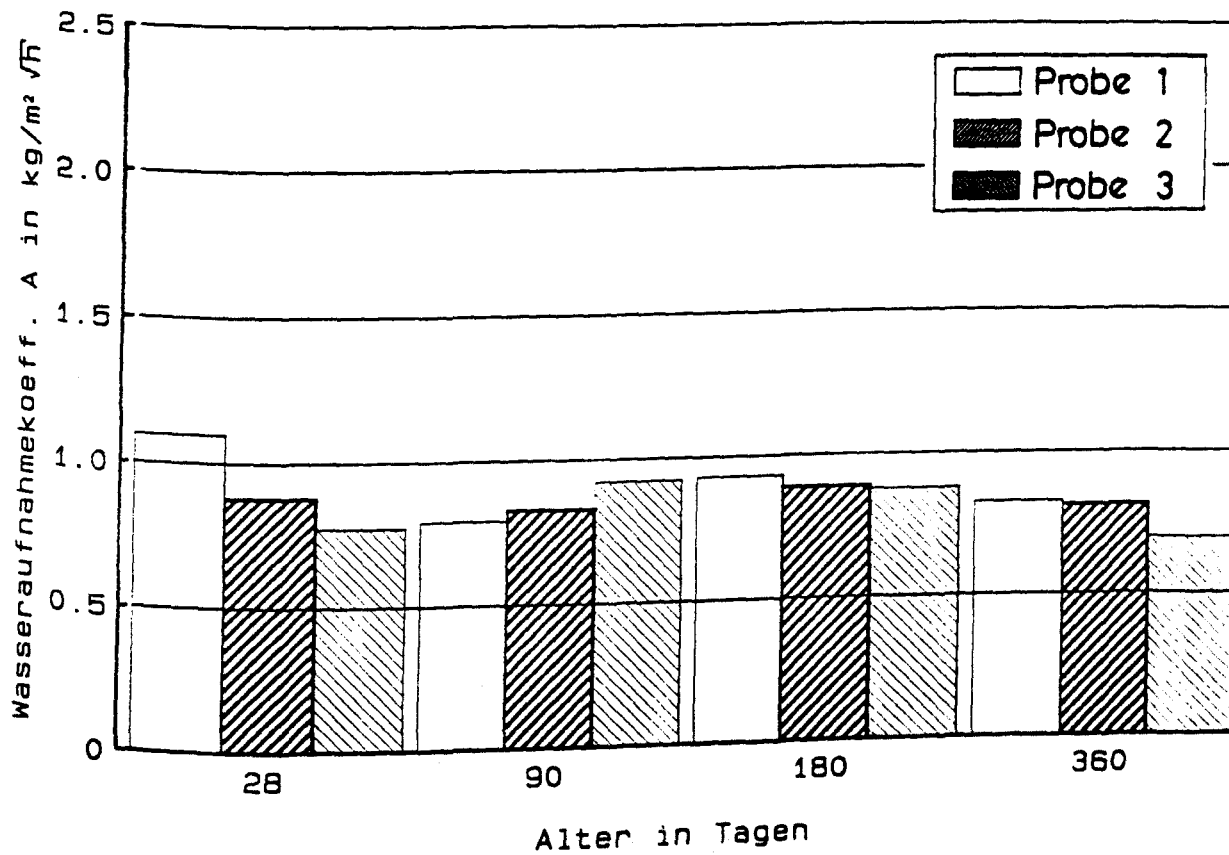


Bild 4.6.14 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand VI. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

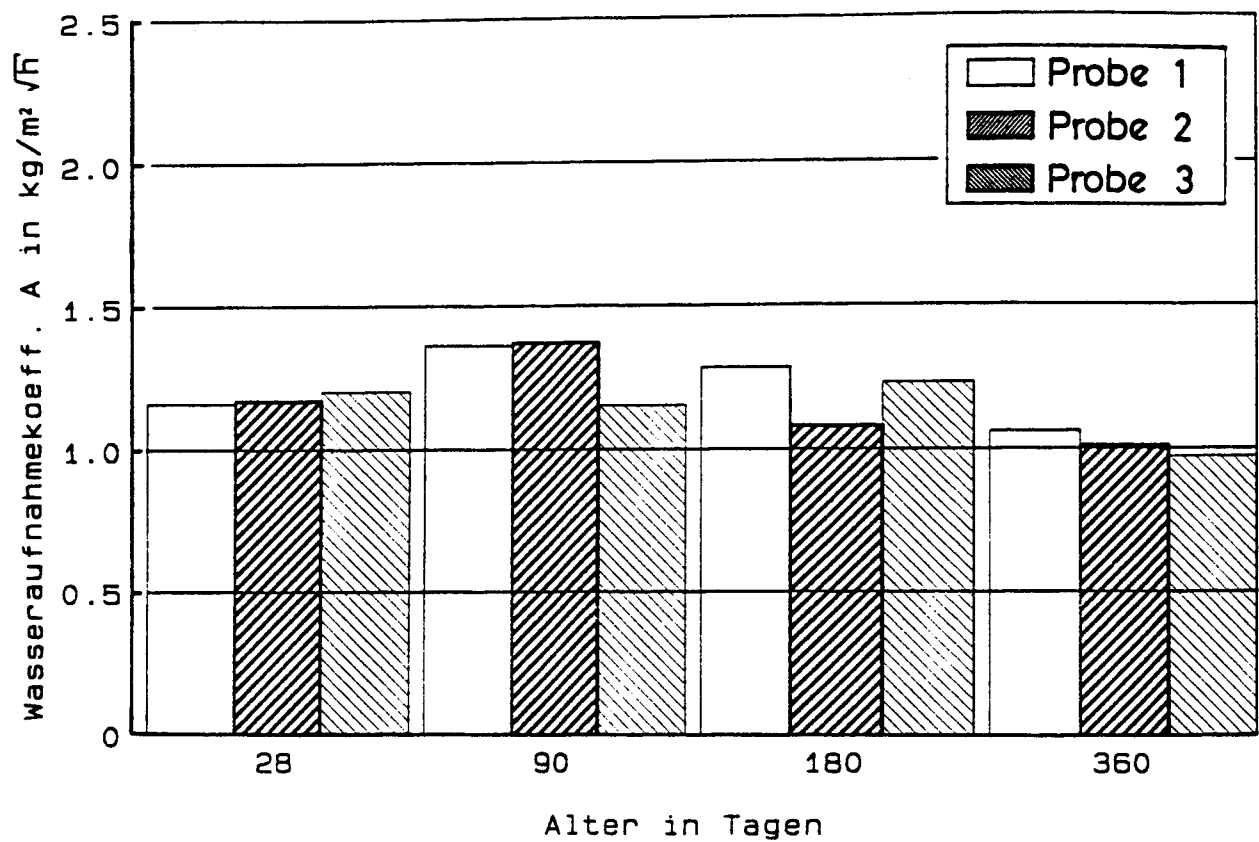


Bild 4.6.15 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand VII. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

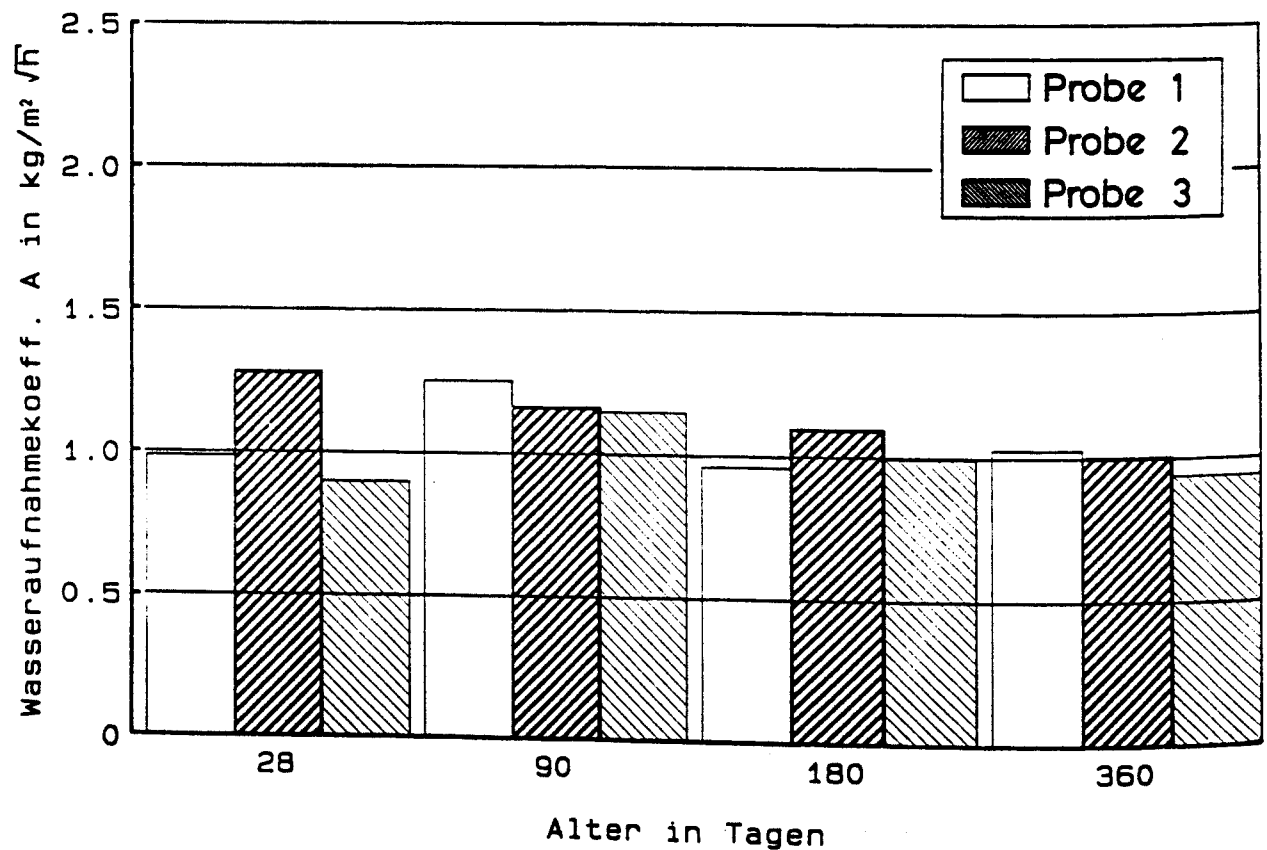


Bild 4.6.16 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand VIII. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

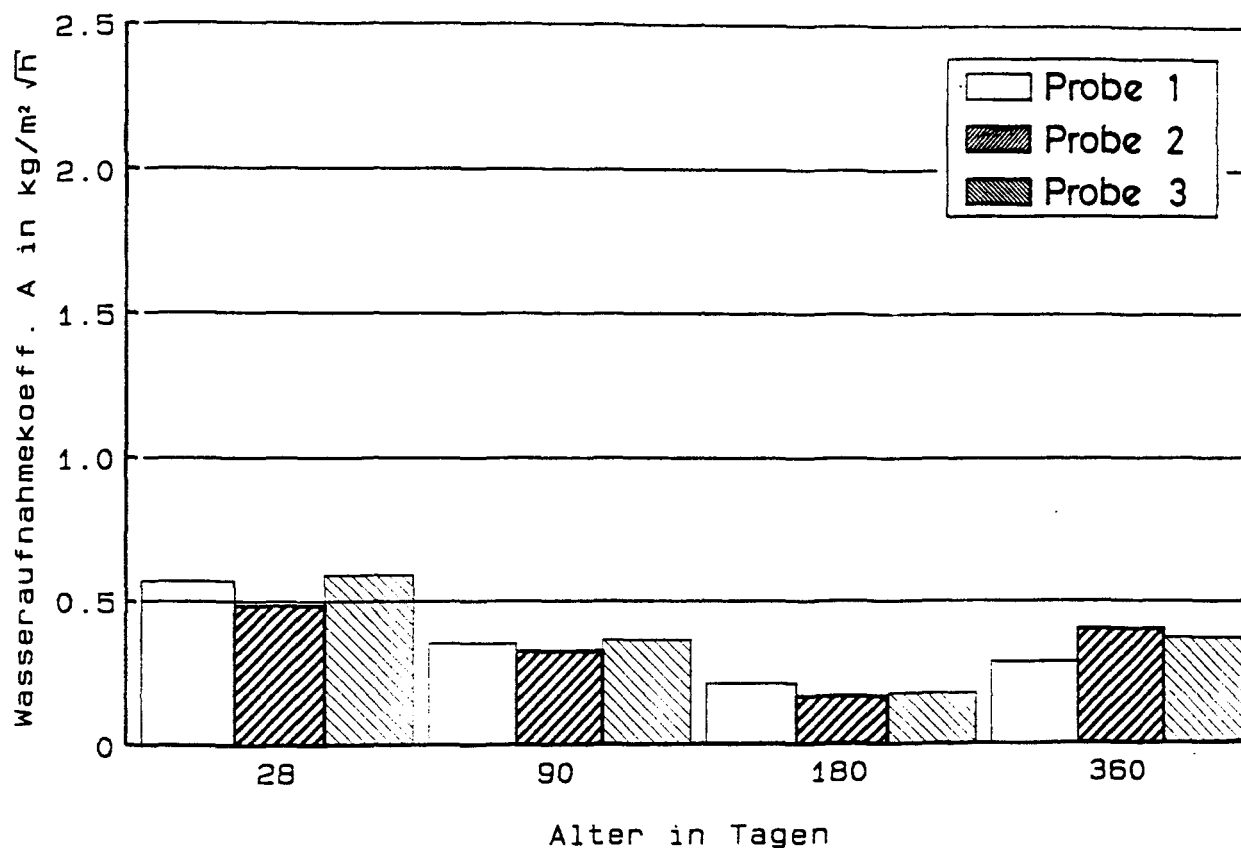


Bild 4.6.17 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand I. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

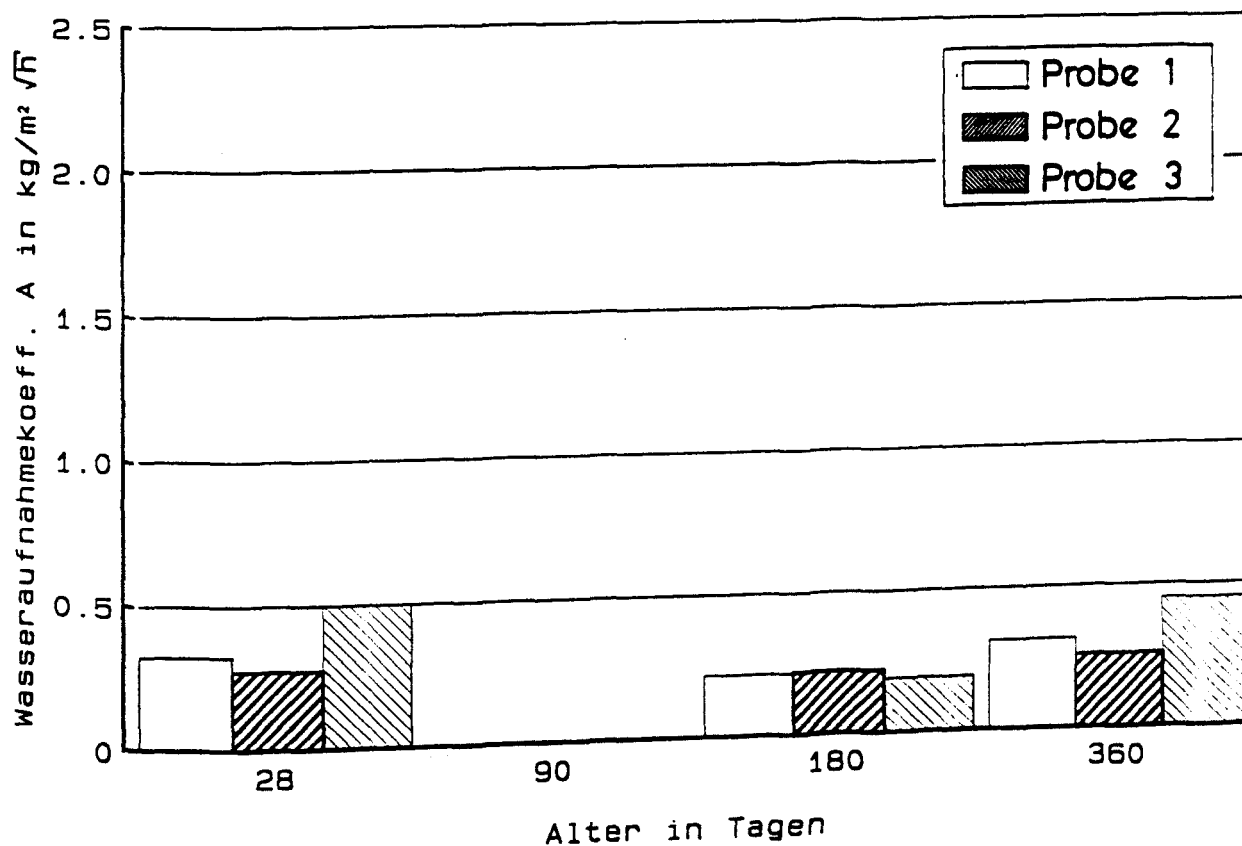


Bild 4.6.18 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand II. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

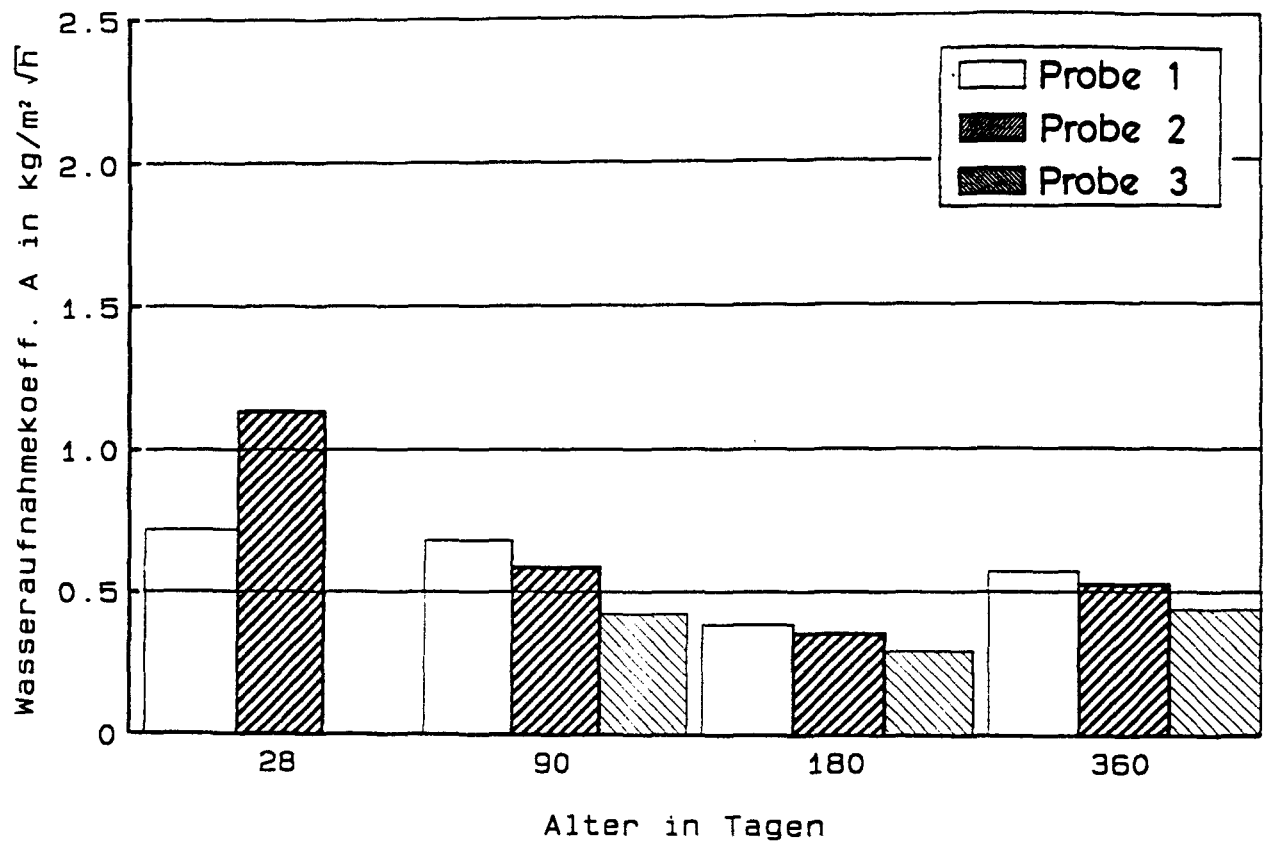


Bild 4.6.19 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand III. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

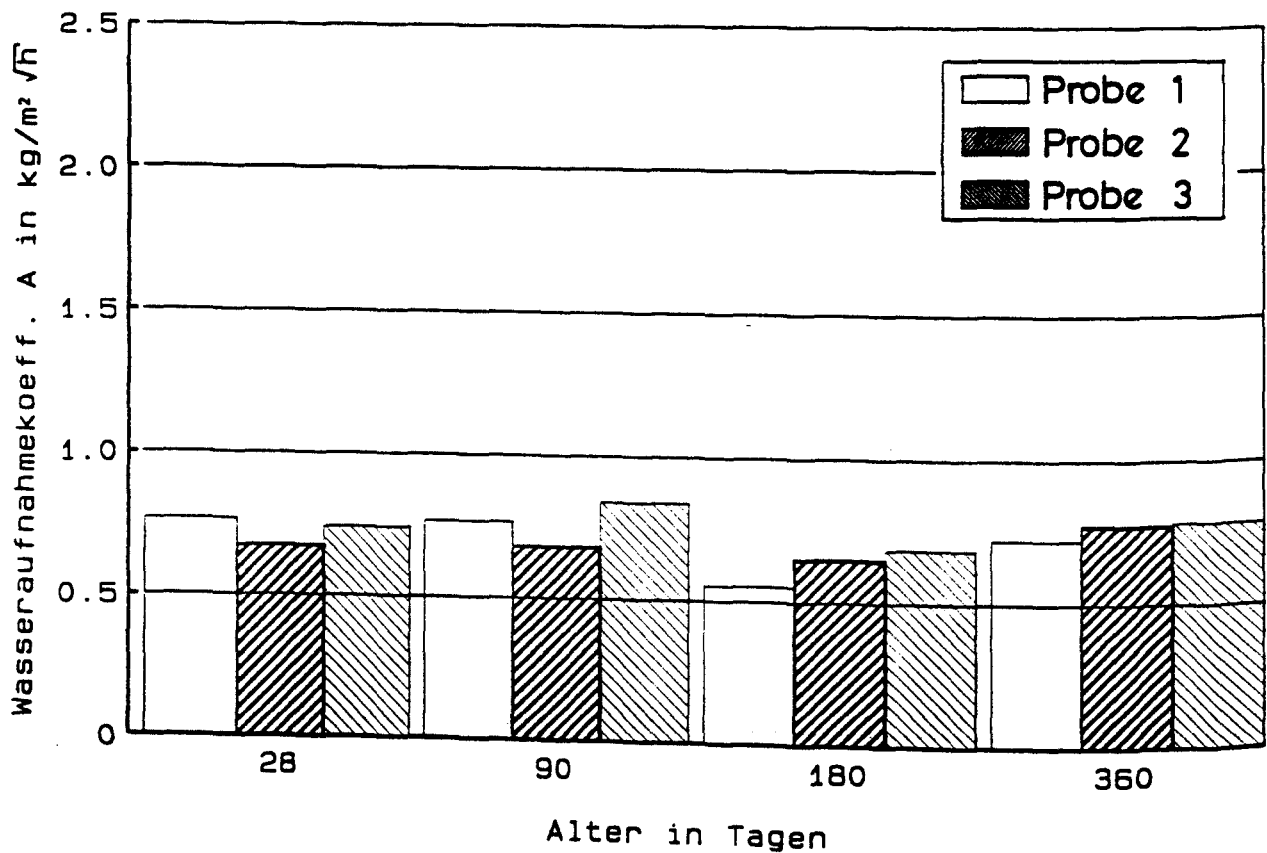


Bild 4.6.20 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand IV. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

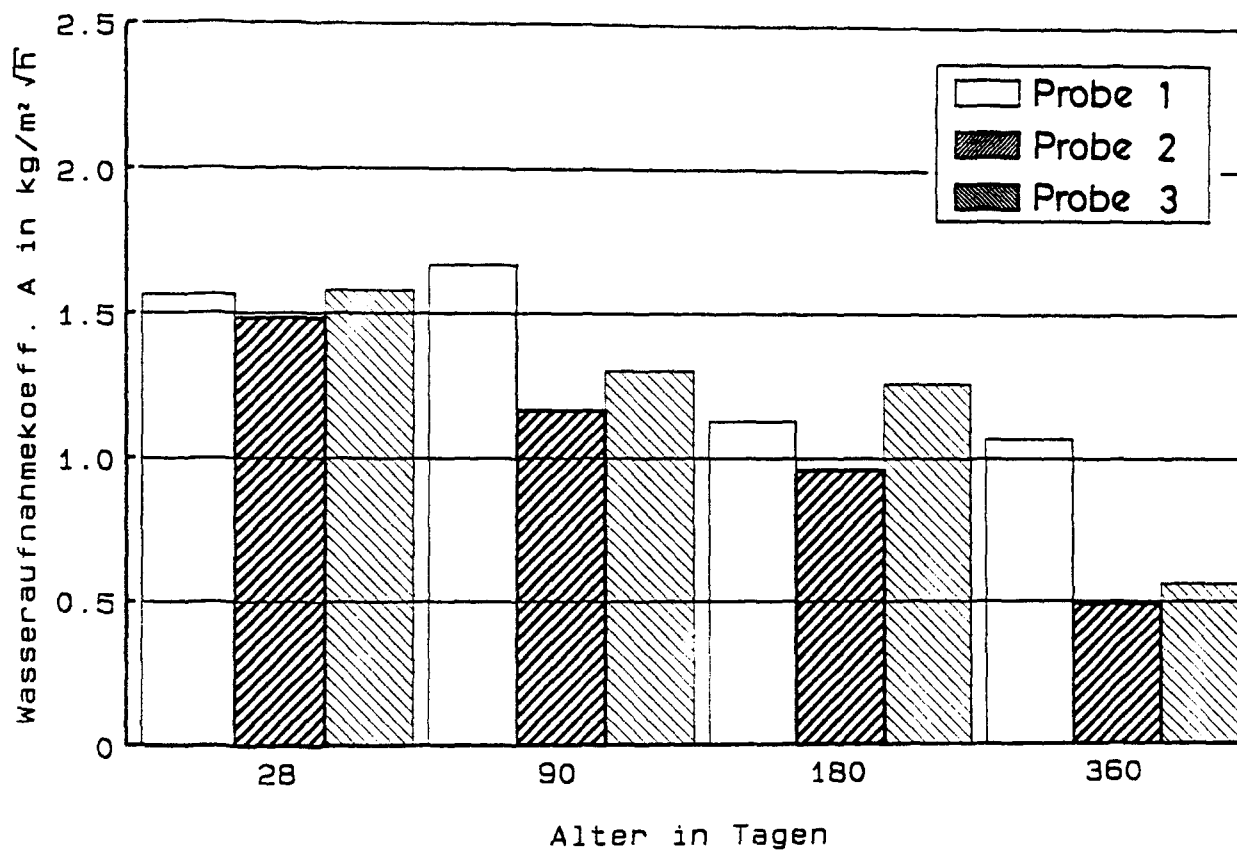


Bild 4.6.21 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand V. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

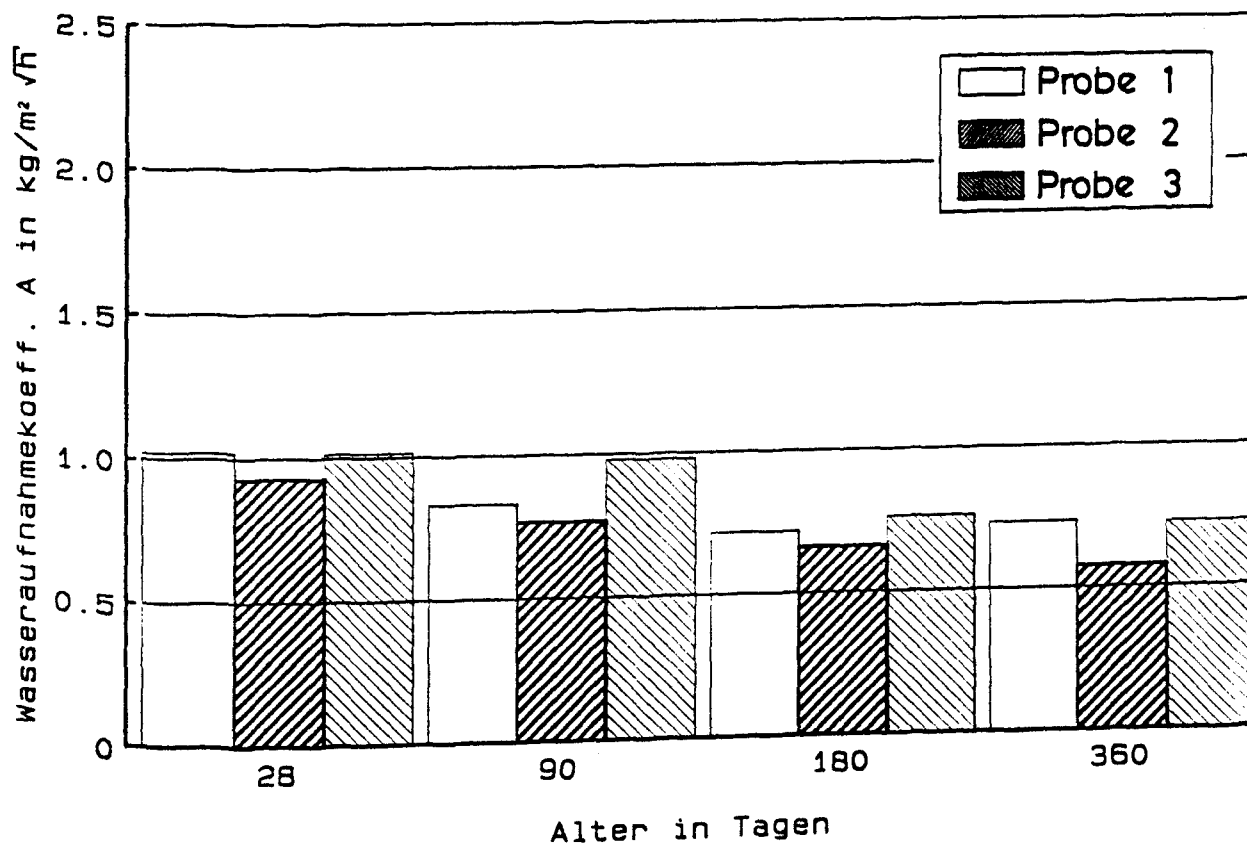


Bild 4.6.22 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand VI. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

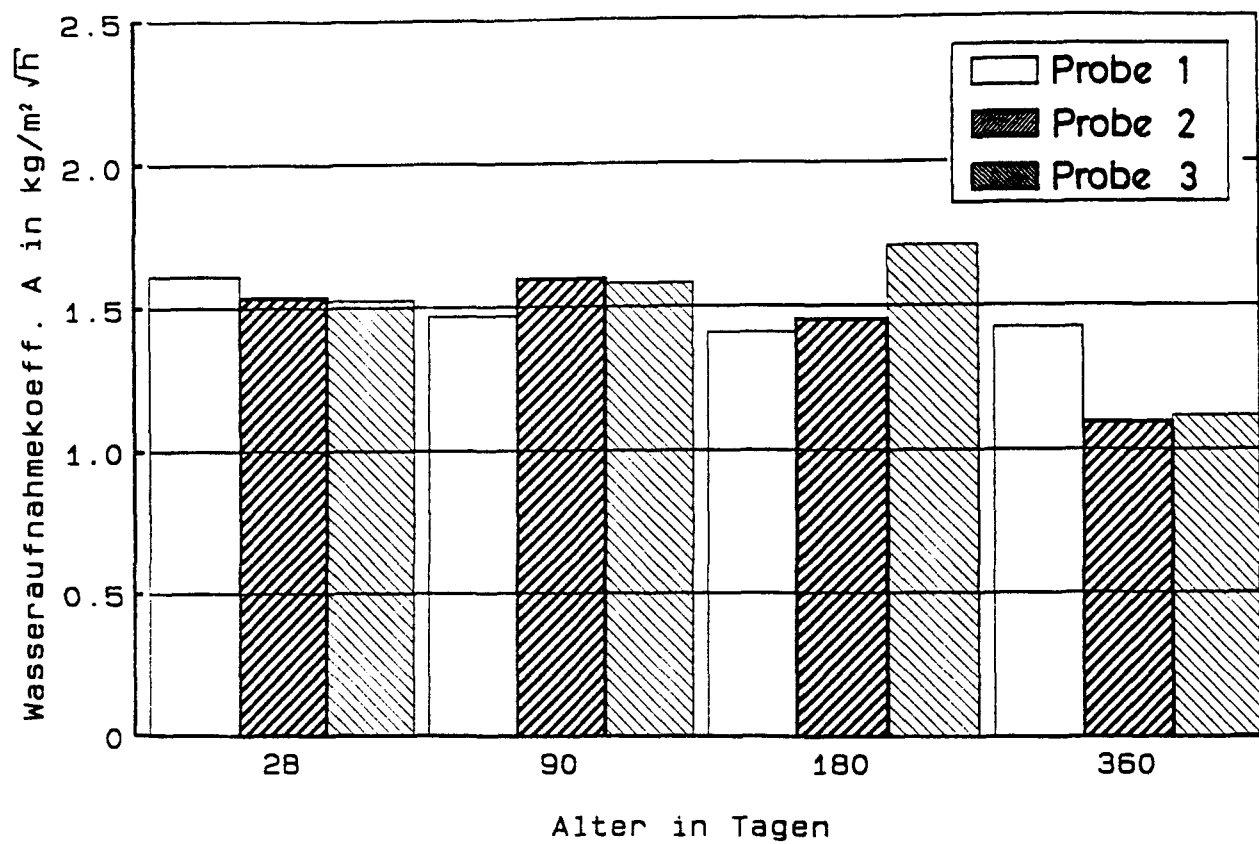


Bild 4.6.23 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand VII. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

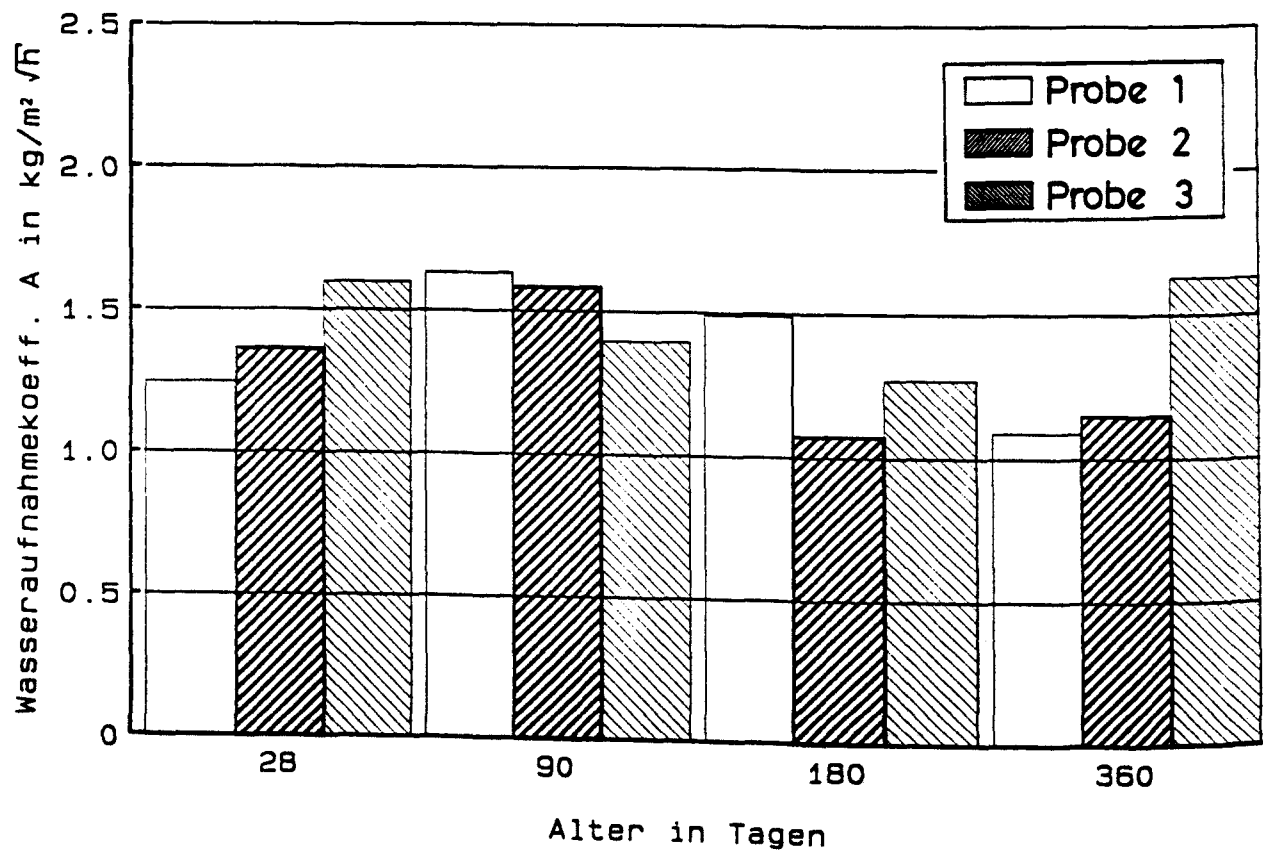


Bild 4.6.24 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand VIII. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

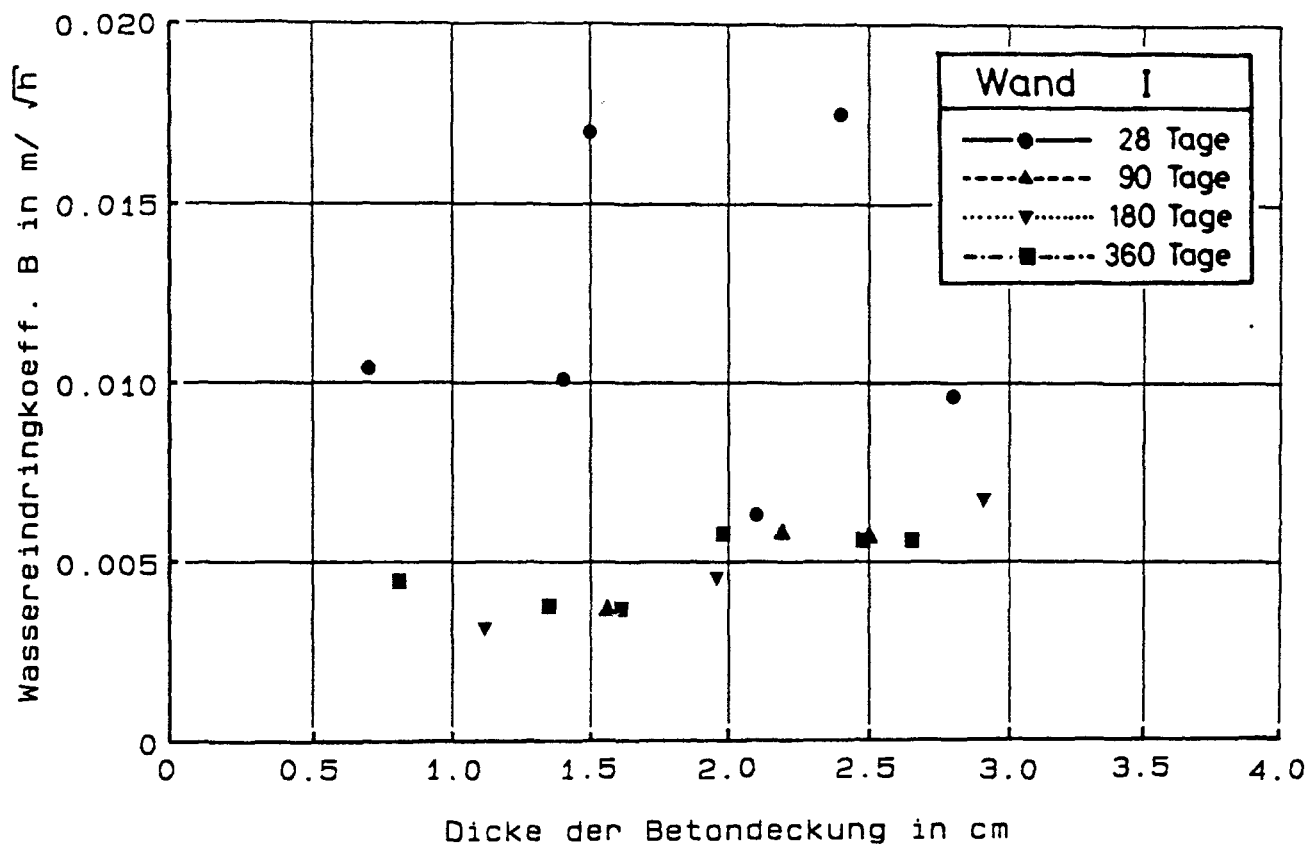


Bild 4.6.25 : Abhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand I.

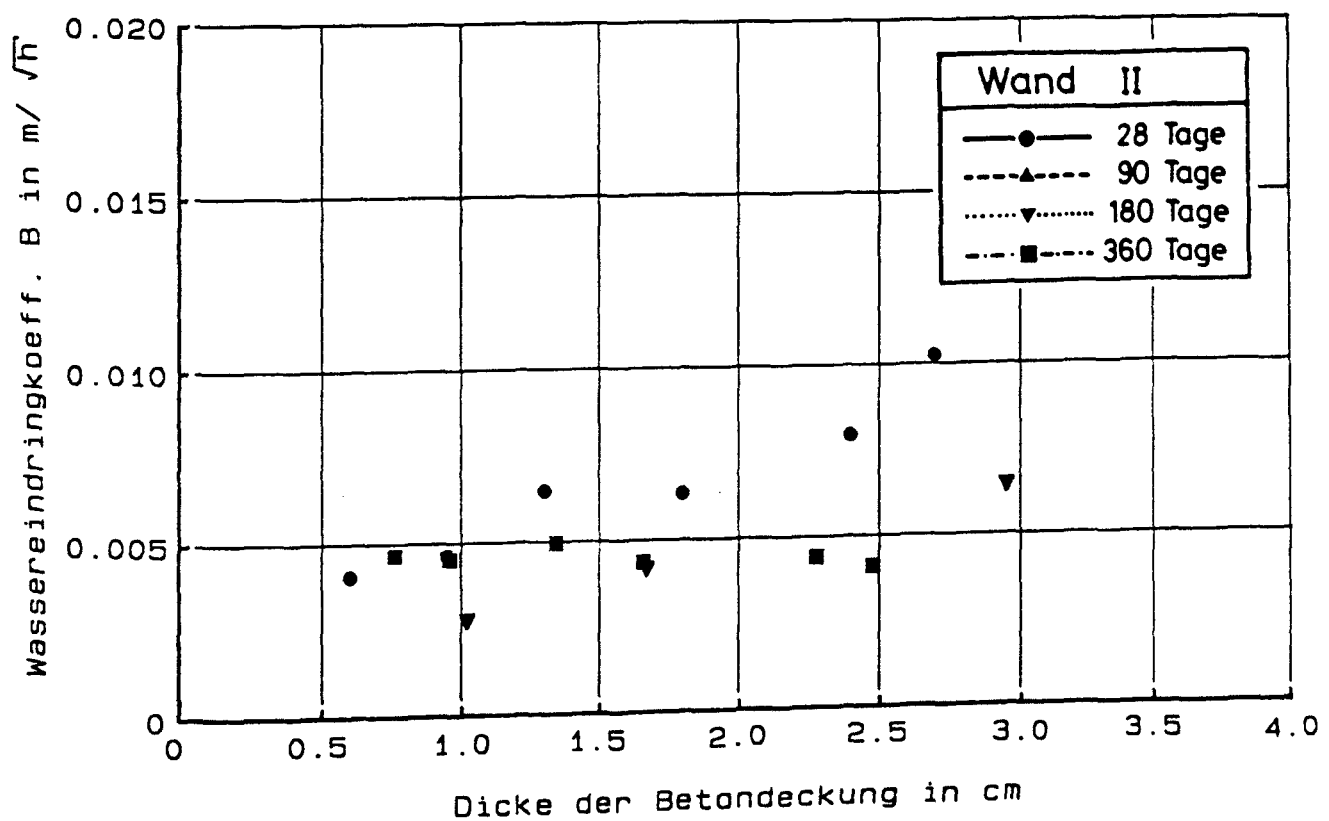


Bild 4.6.26 : Abhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand II.

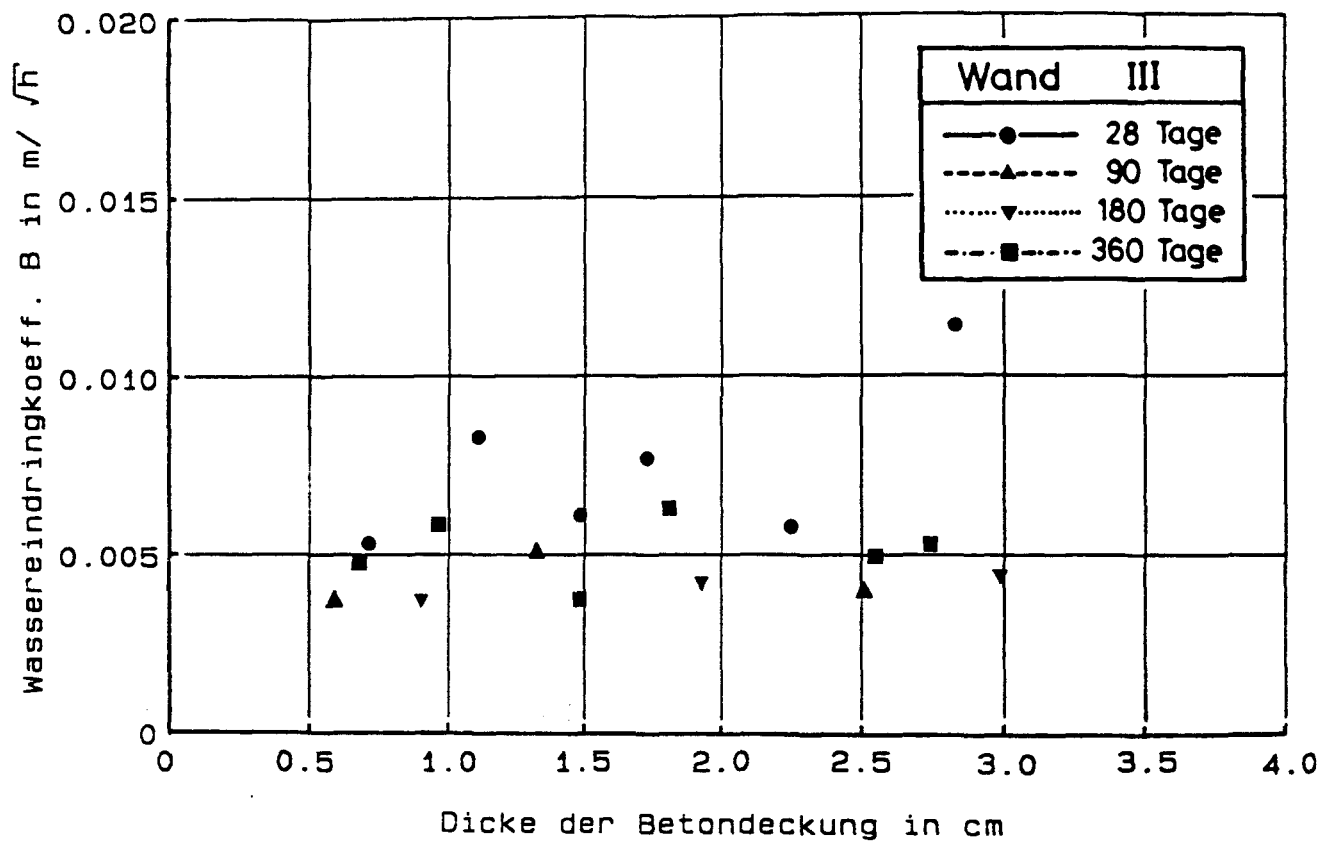


Bild 4.6.27 : Abhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand III.

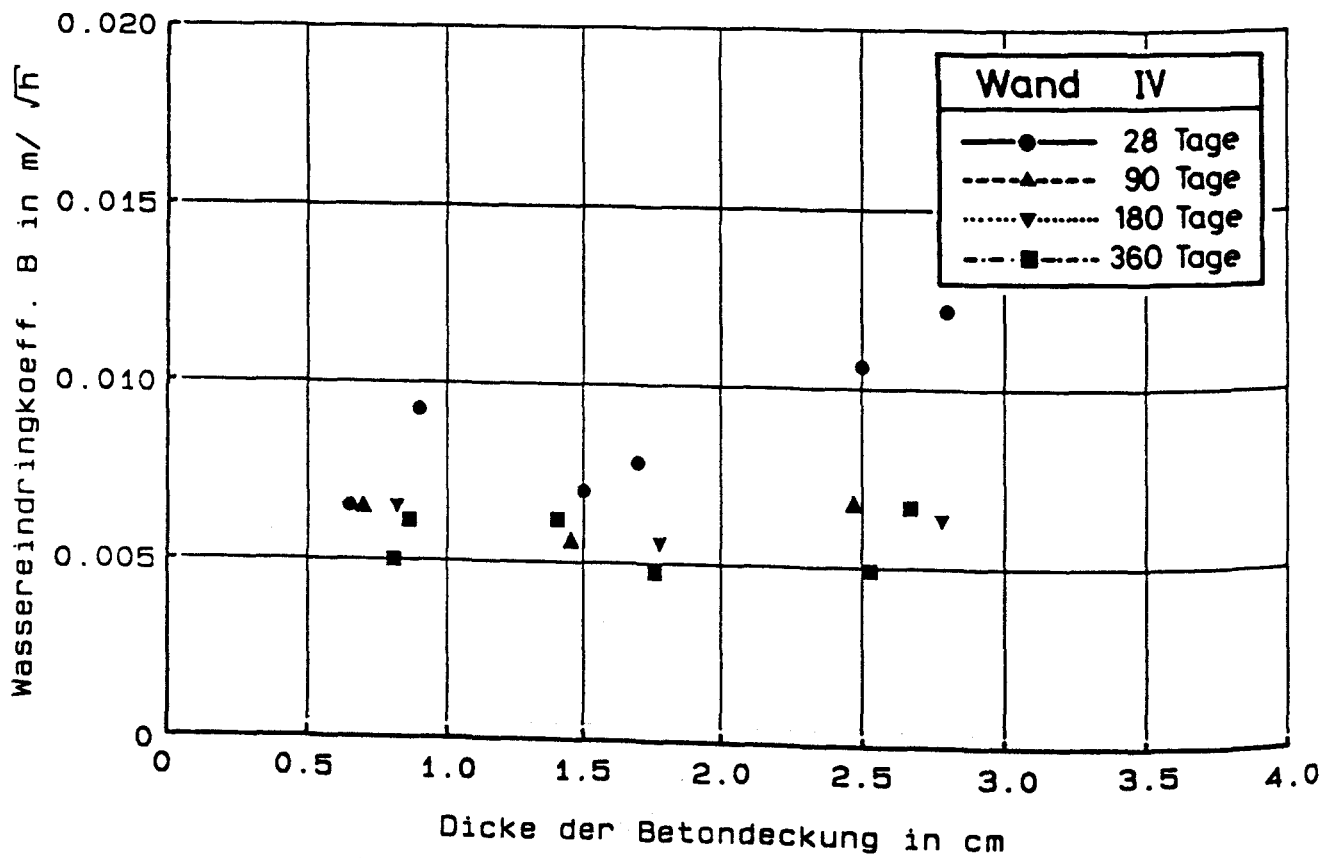


Bild 4.6.28 : Abhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand IV.

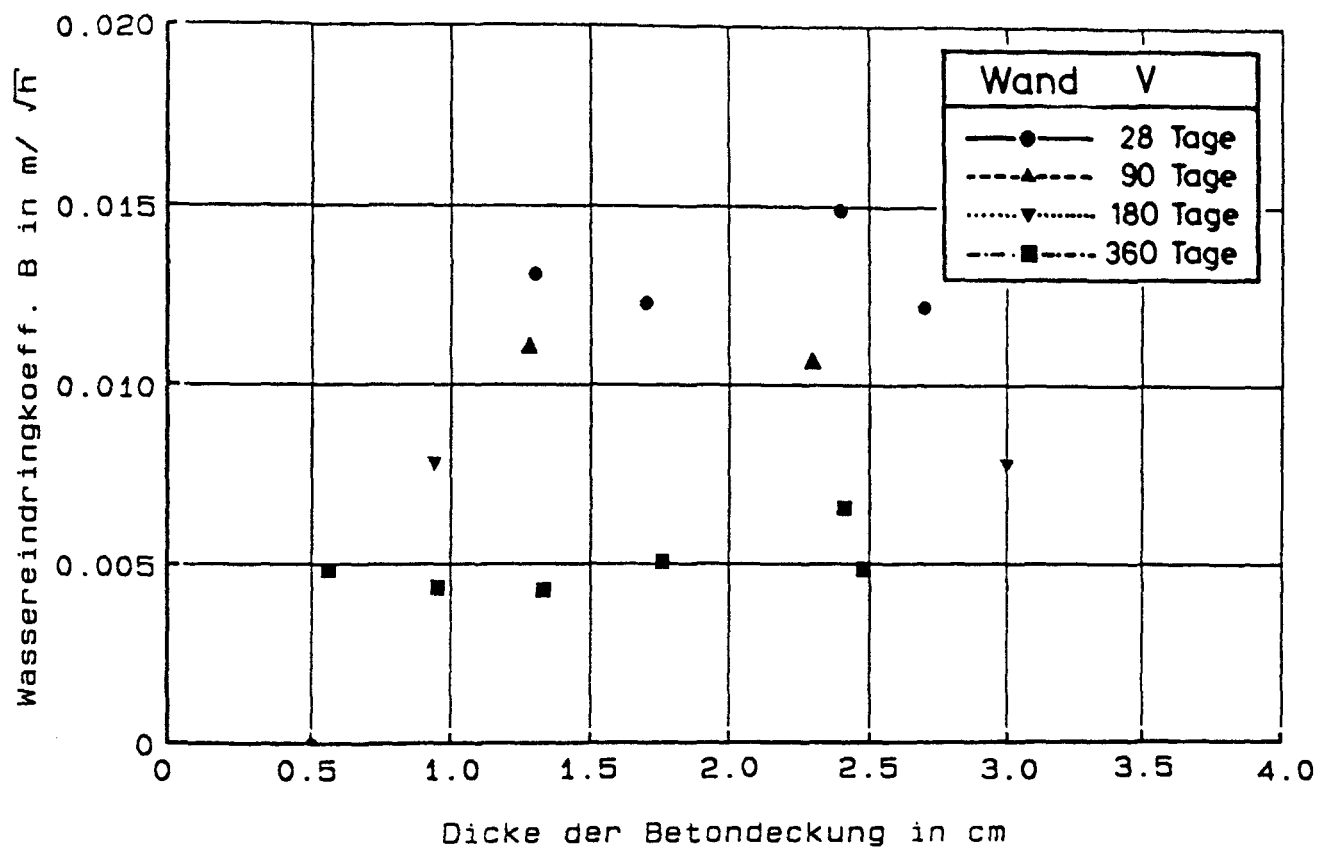


Bild 4.6.29 : Abhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand V.

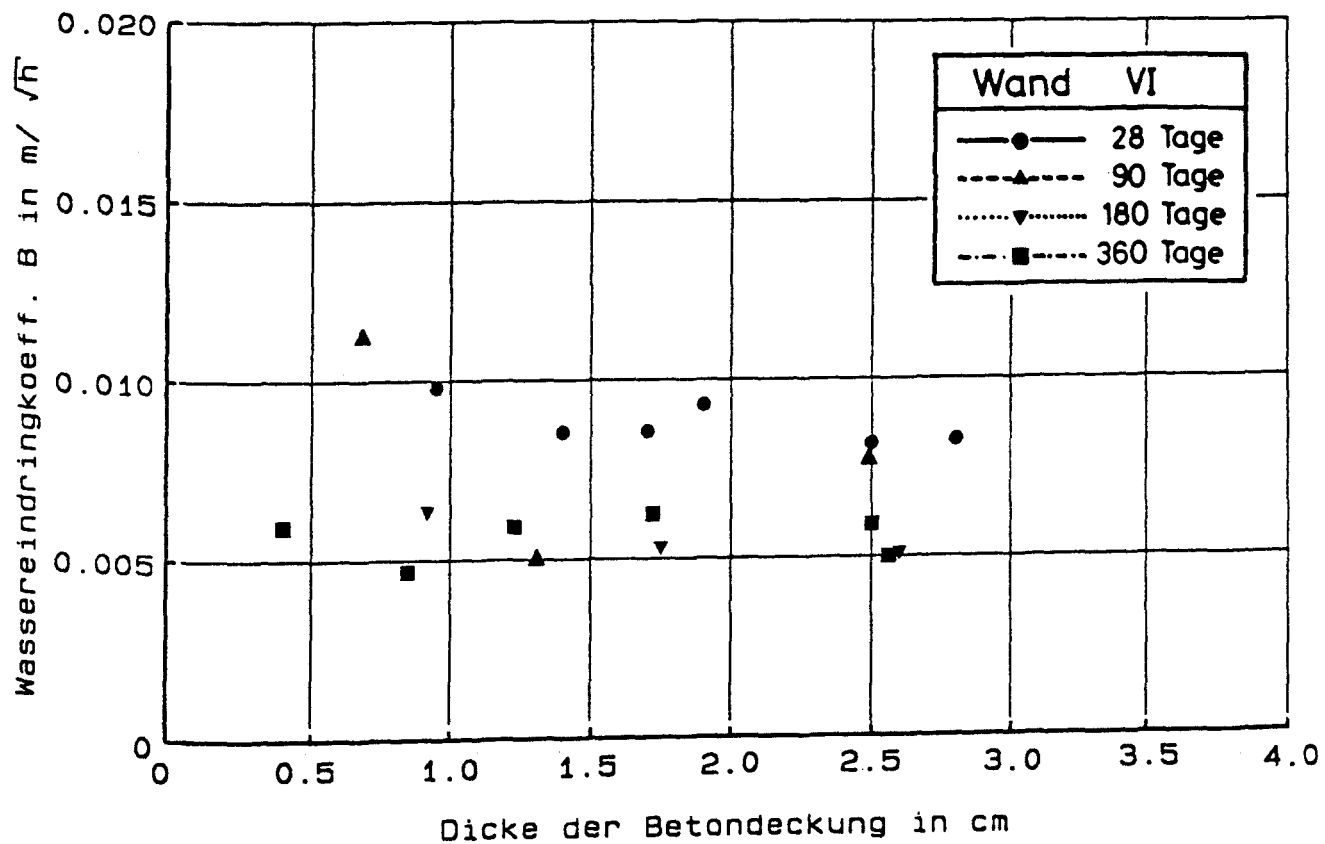


Bild 4.6.30 : Abhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand VI.

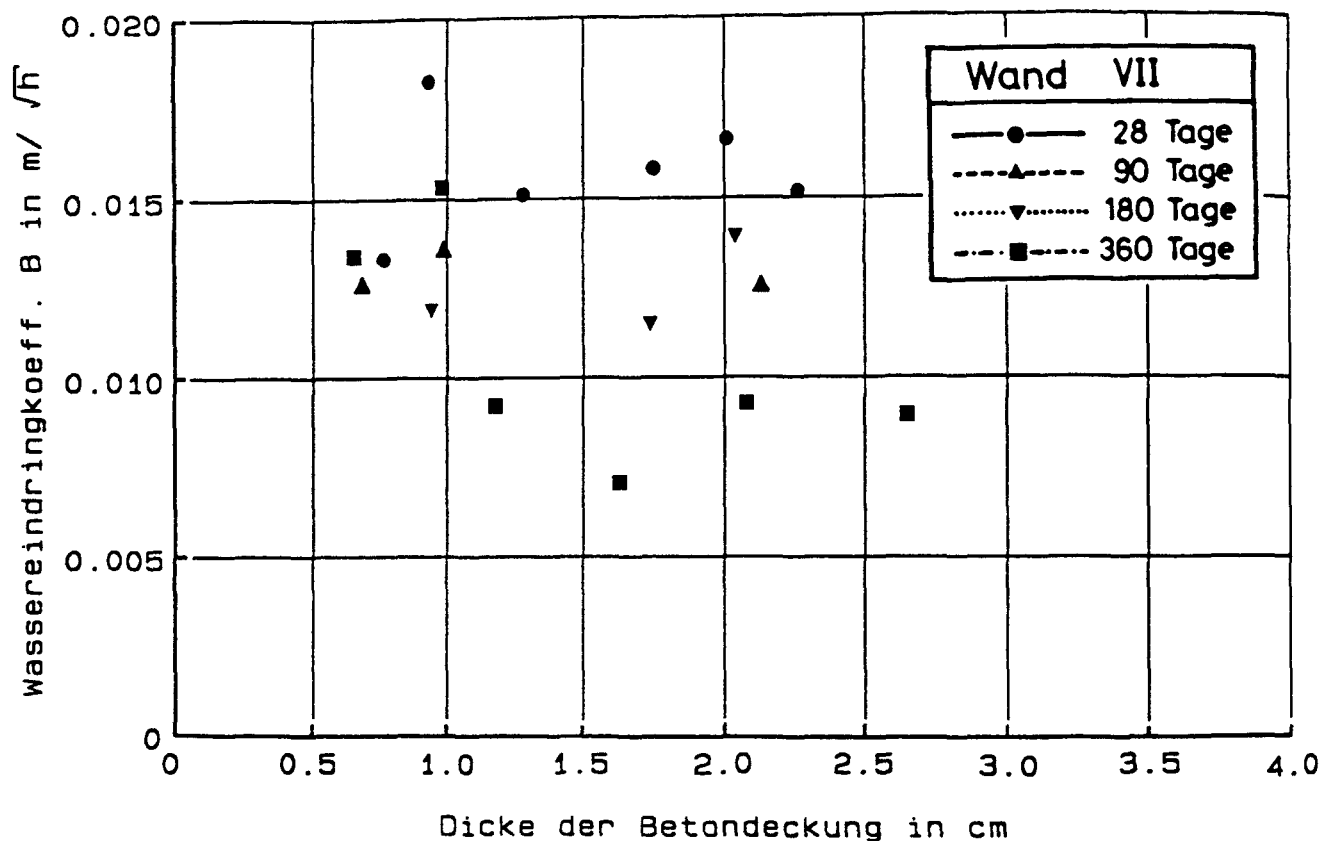


Bild 4.6.31 : Abhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand VII.

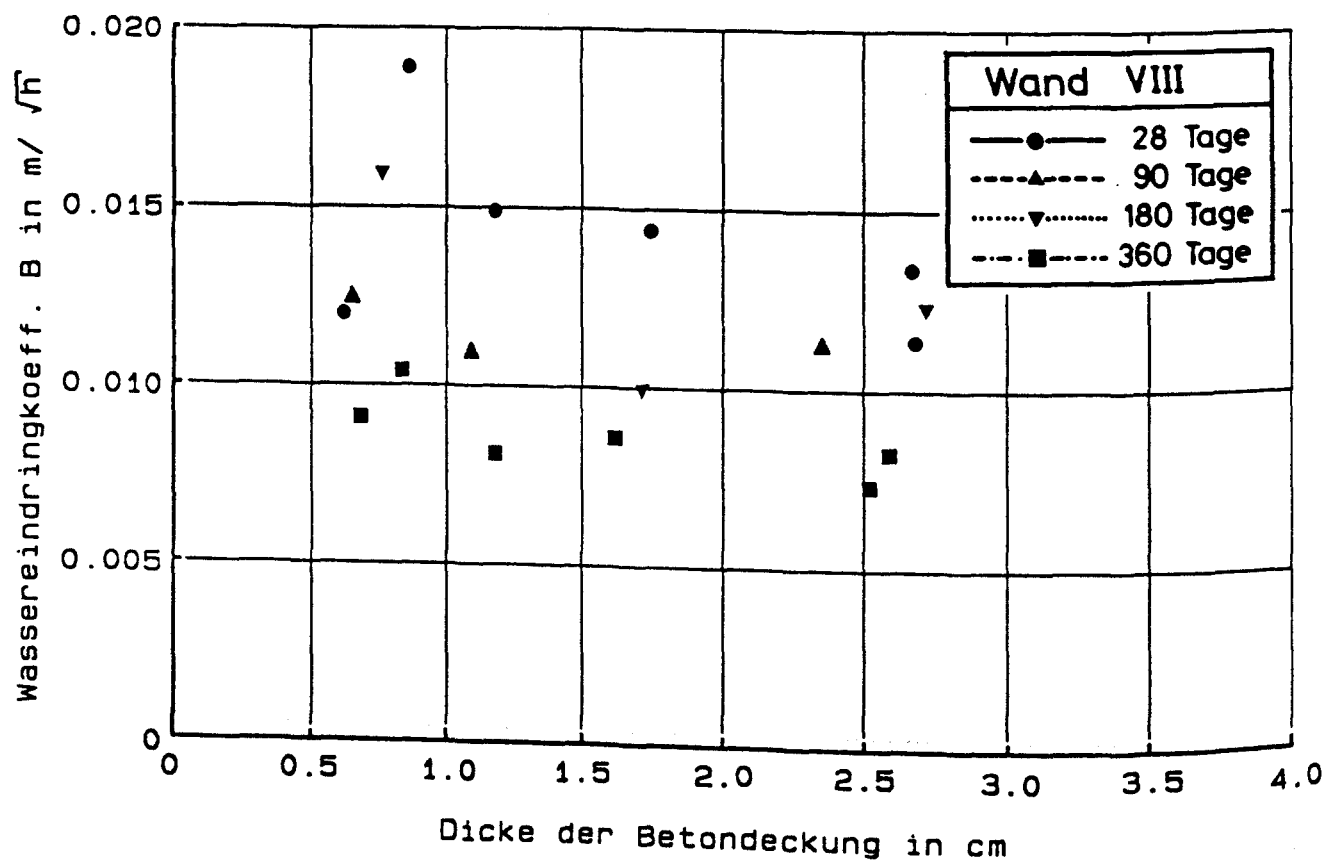


Bild 4.6.32 : Abhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten von der Dicke der Betondeckung für Wand VIII.

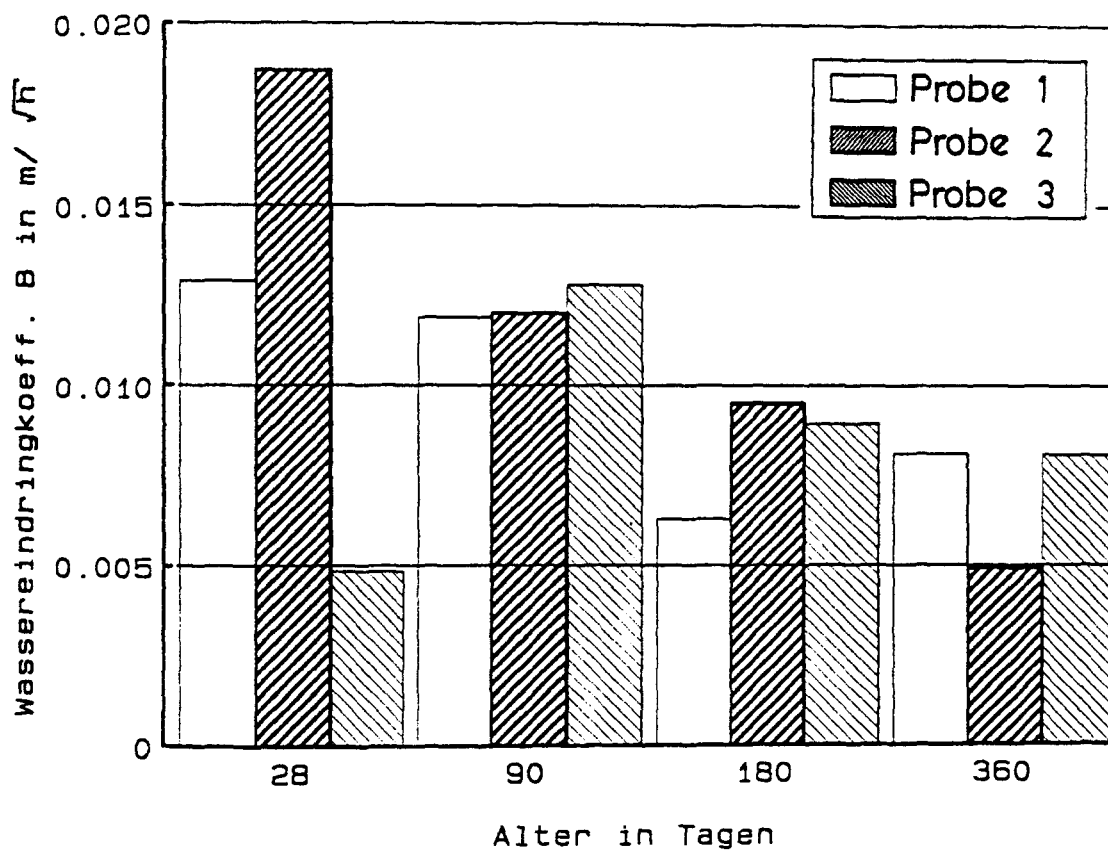


Bild 4.6.33 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand I. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

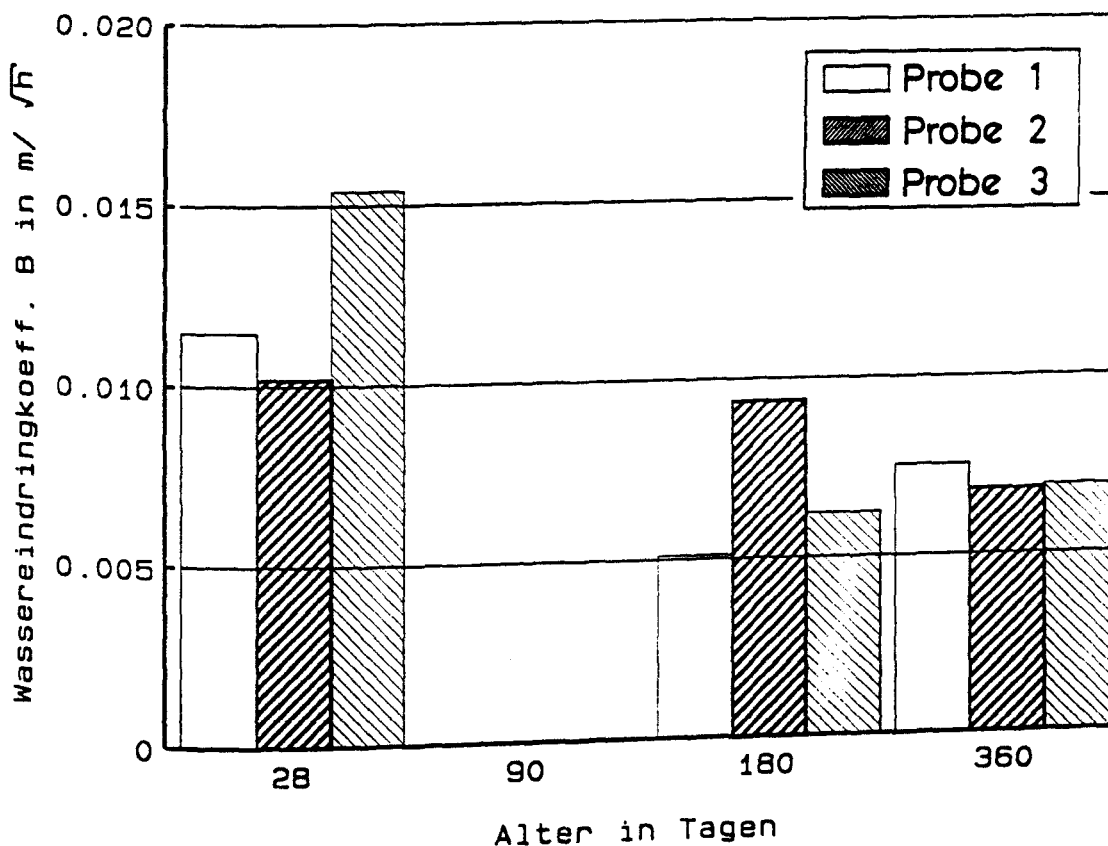


Bild 4.6.34 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand II. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

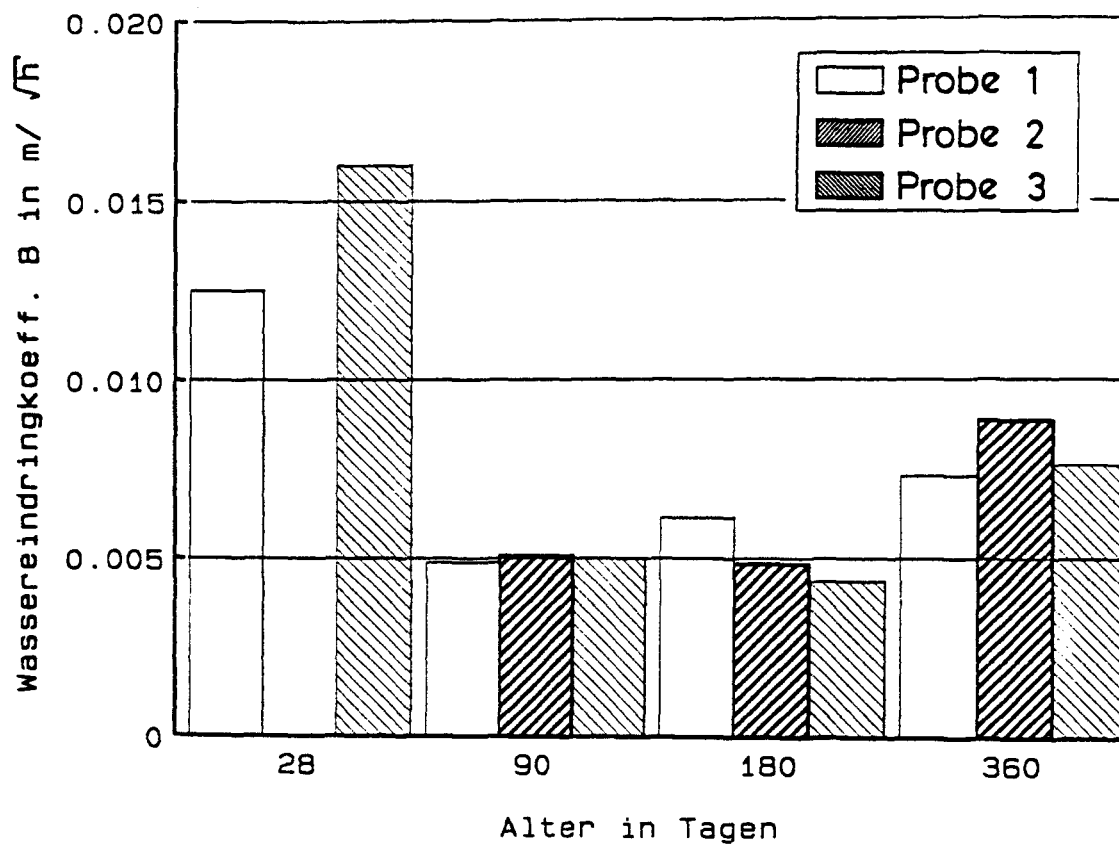


Bild 4.6.35 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand III. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

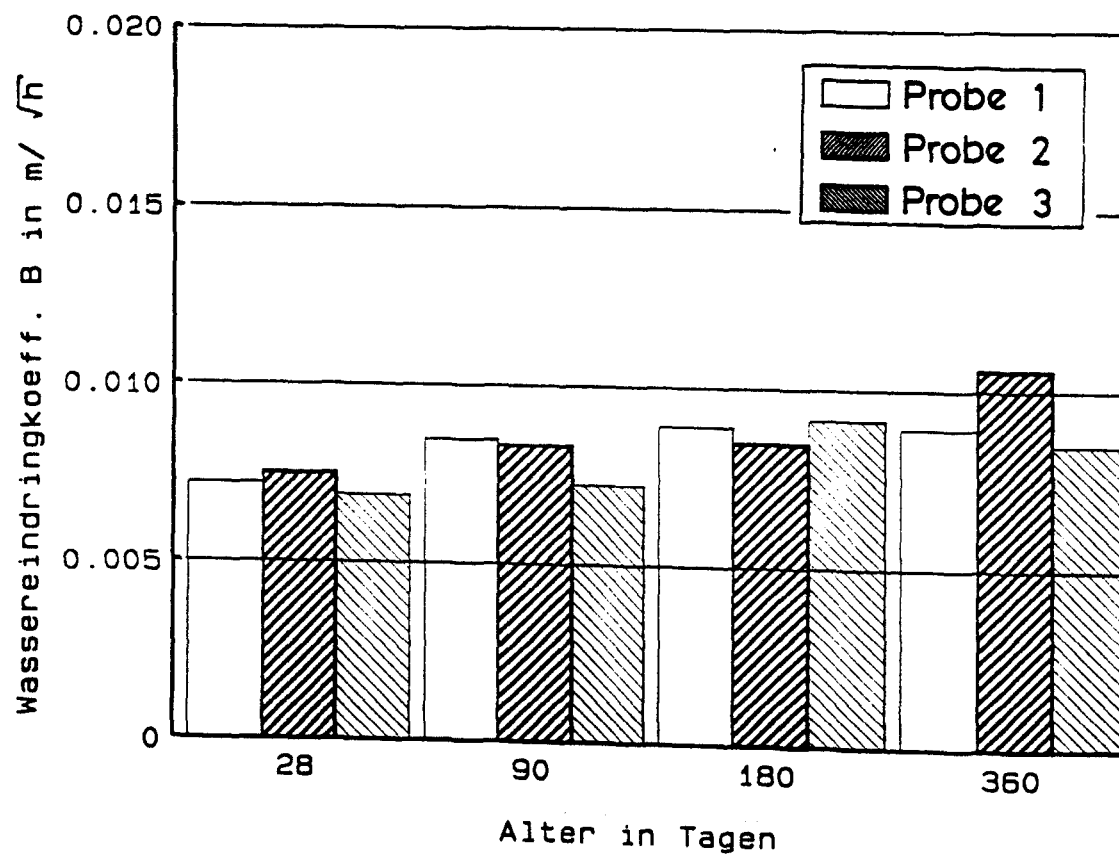


Bild 4.6.36 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand IV. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

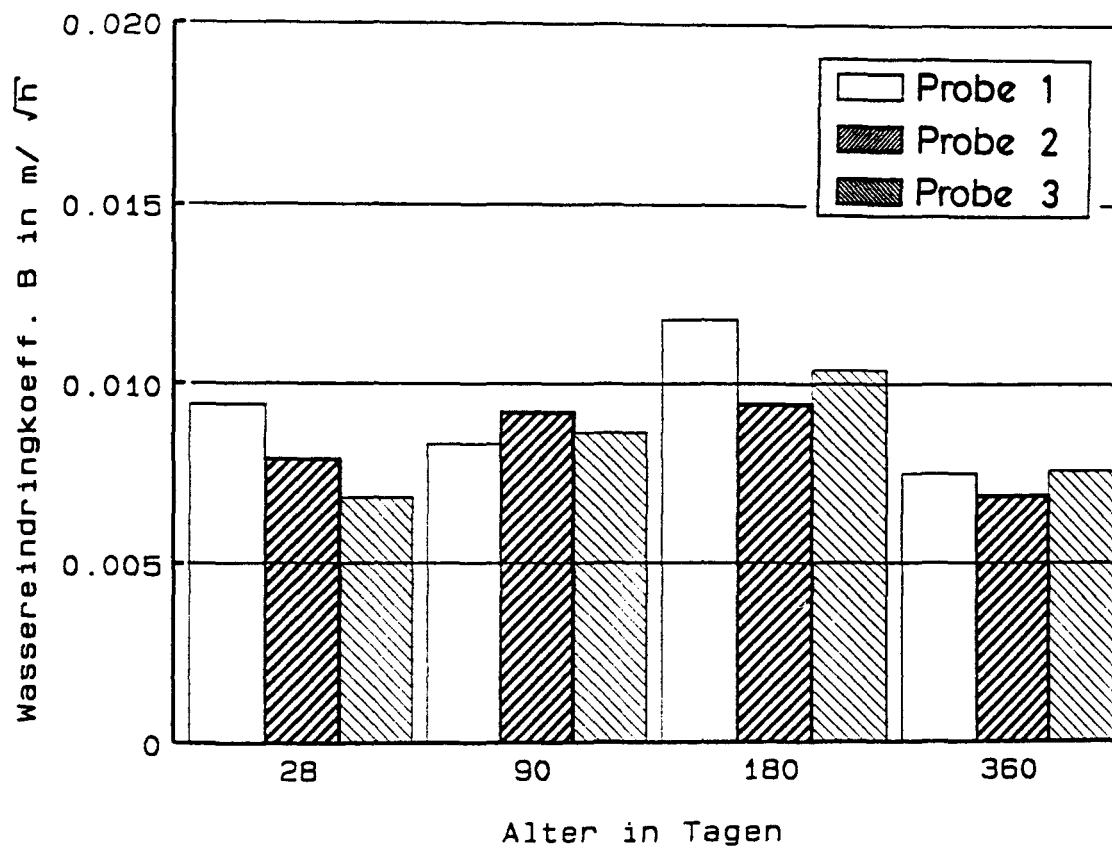


Bild 4.6.37 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand V. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

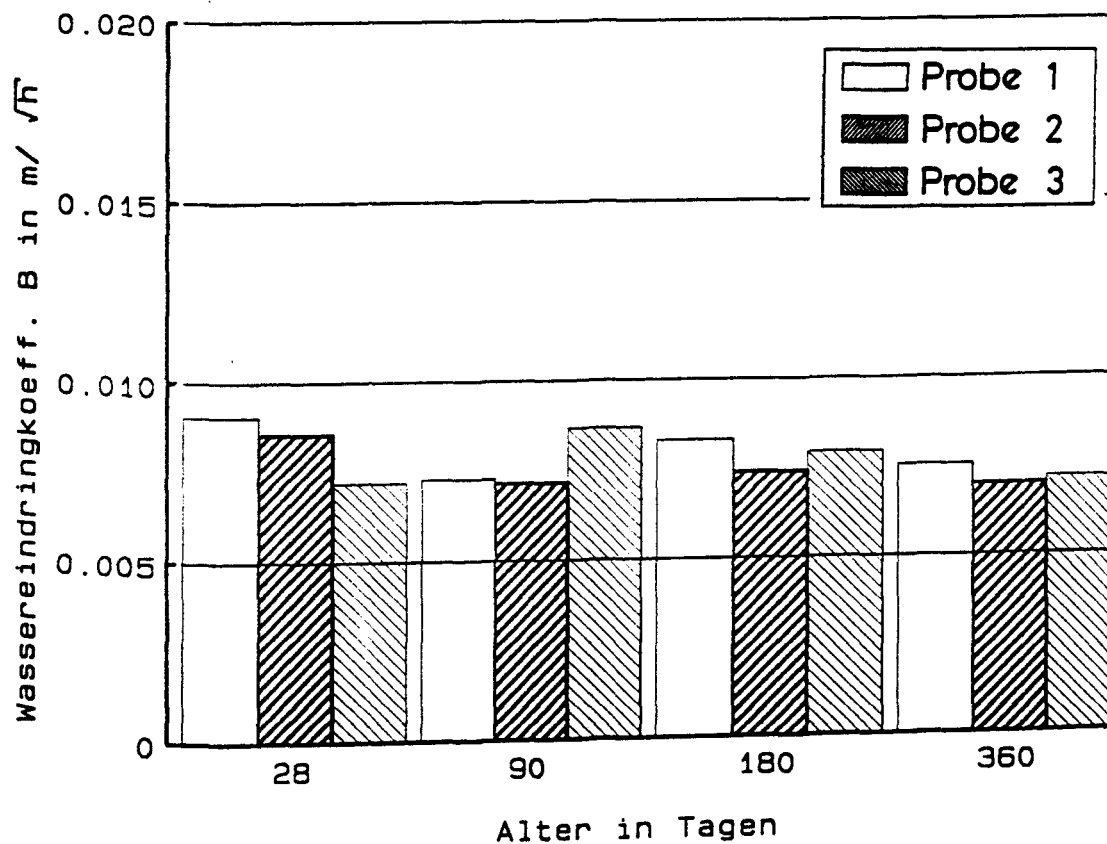


Bild 4.6.38 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand VI. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

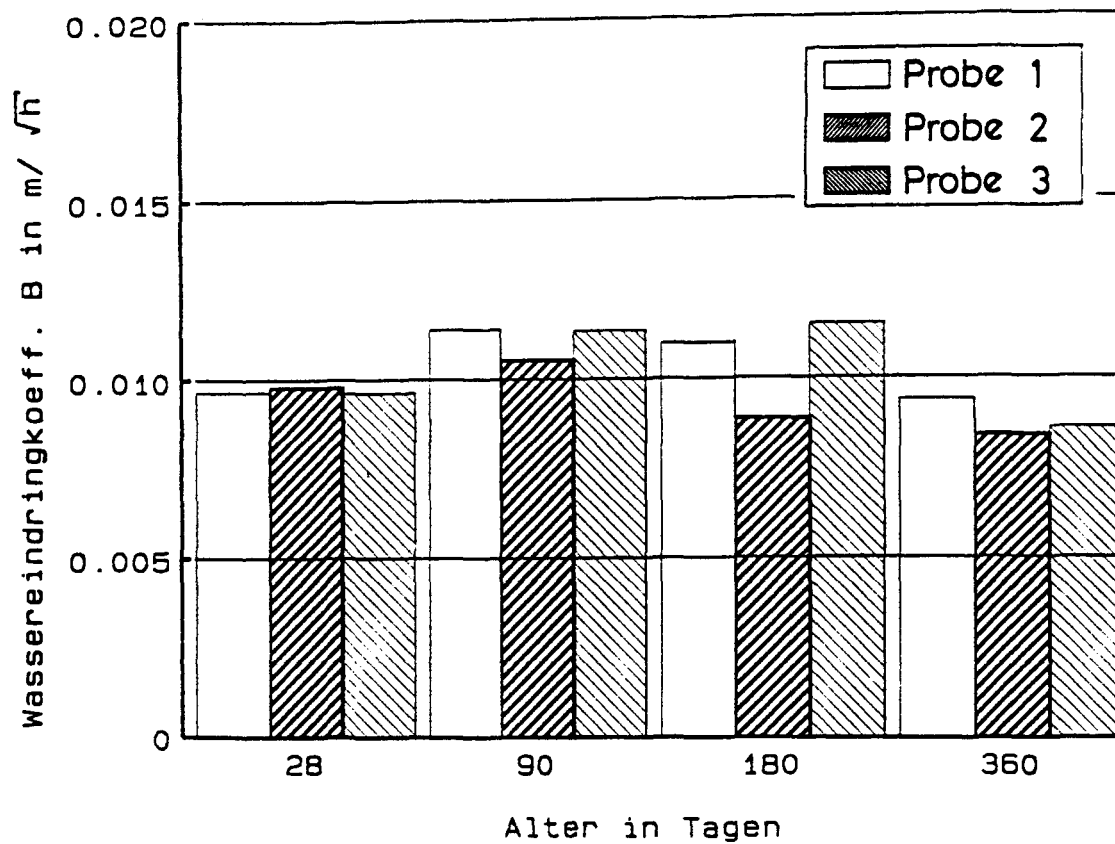


Bild 4.6.39 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand VII. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

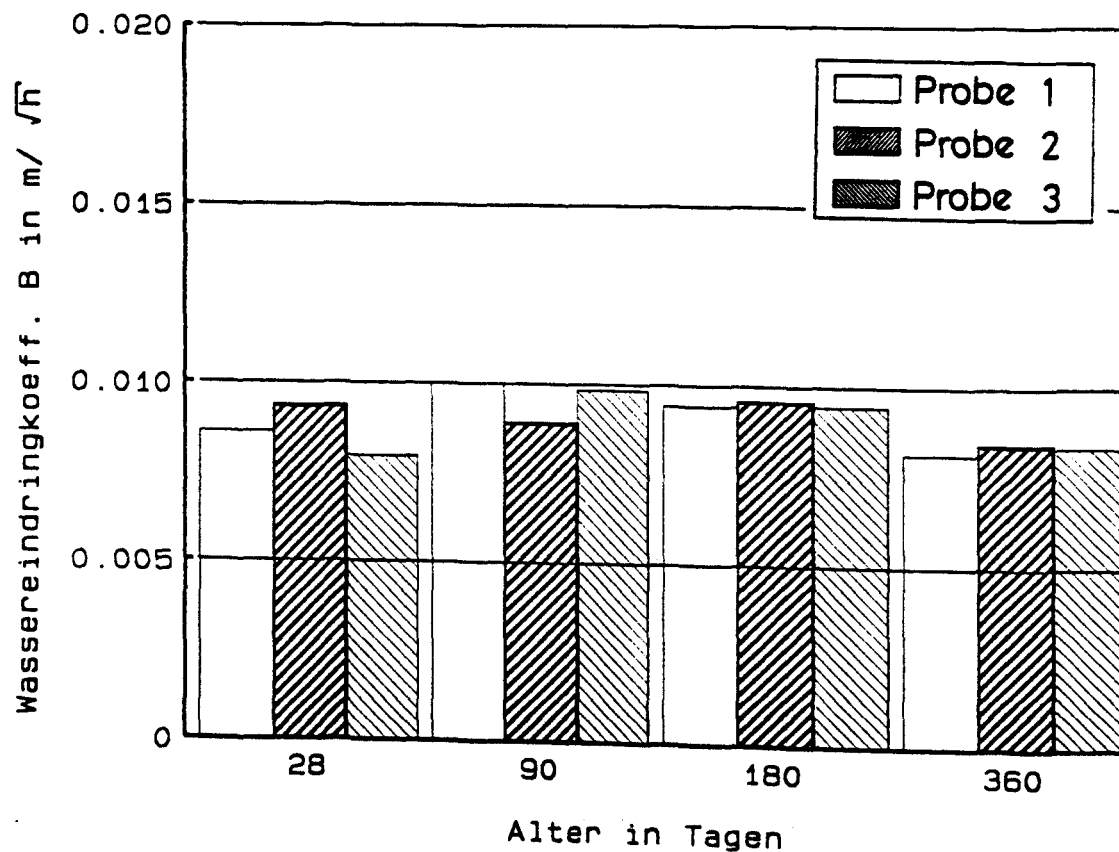


Bild 4.6.40 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand VIII. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

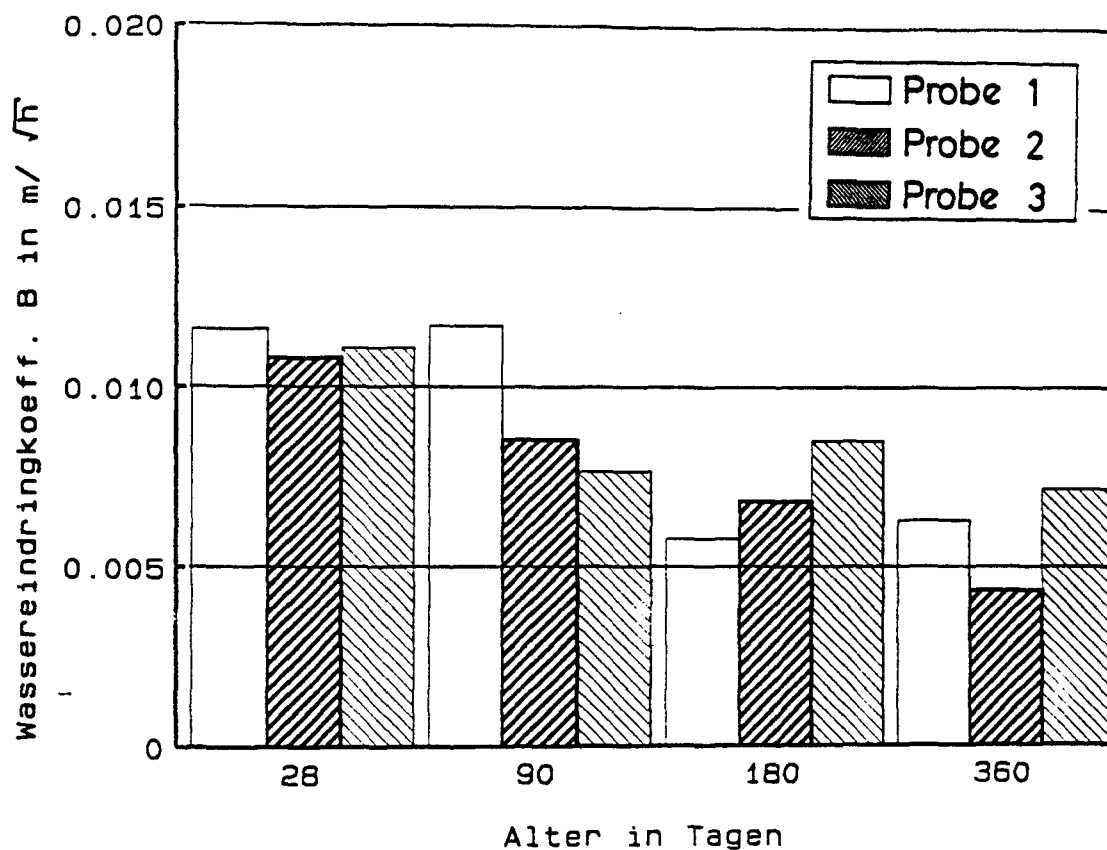


Bild 4.6.41 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand I. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

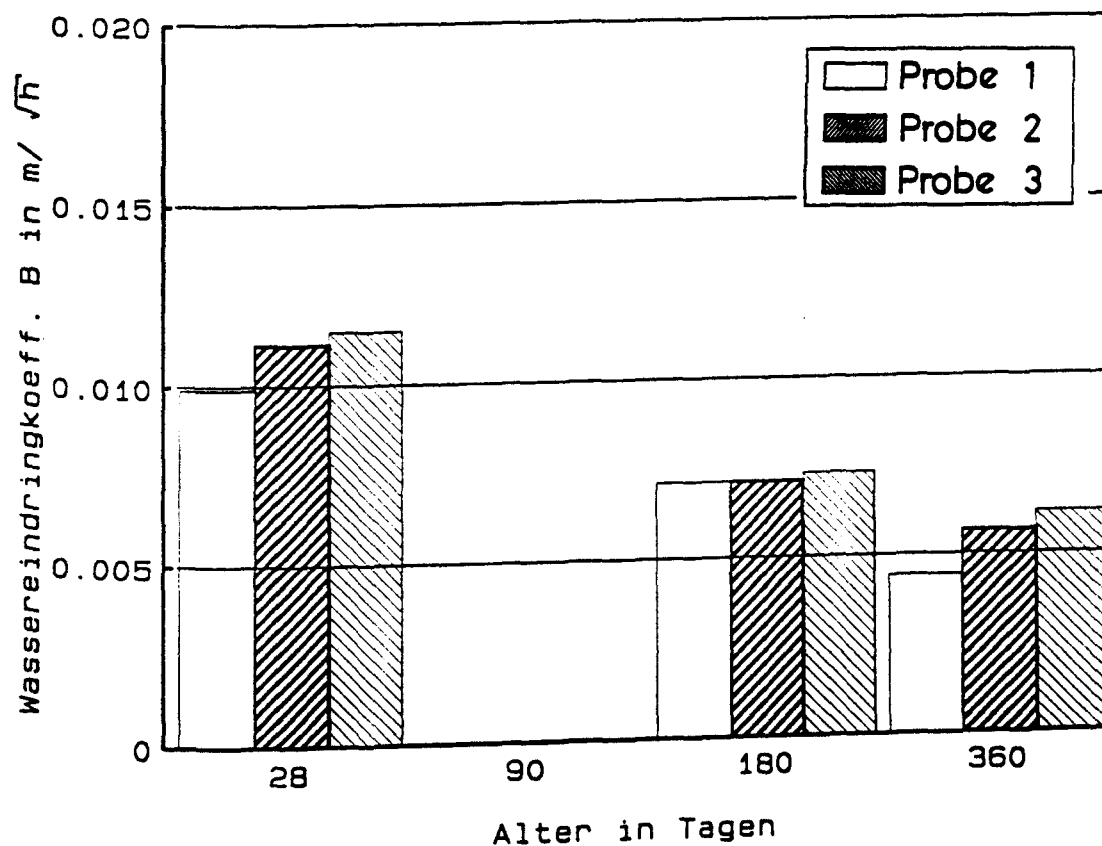


Bild 4.6.42 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand II. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

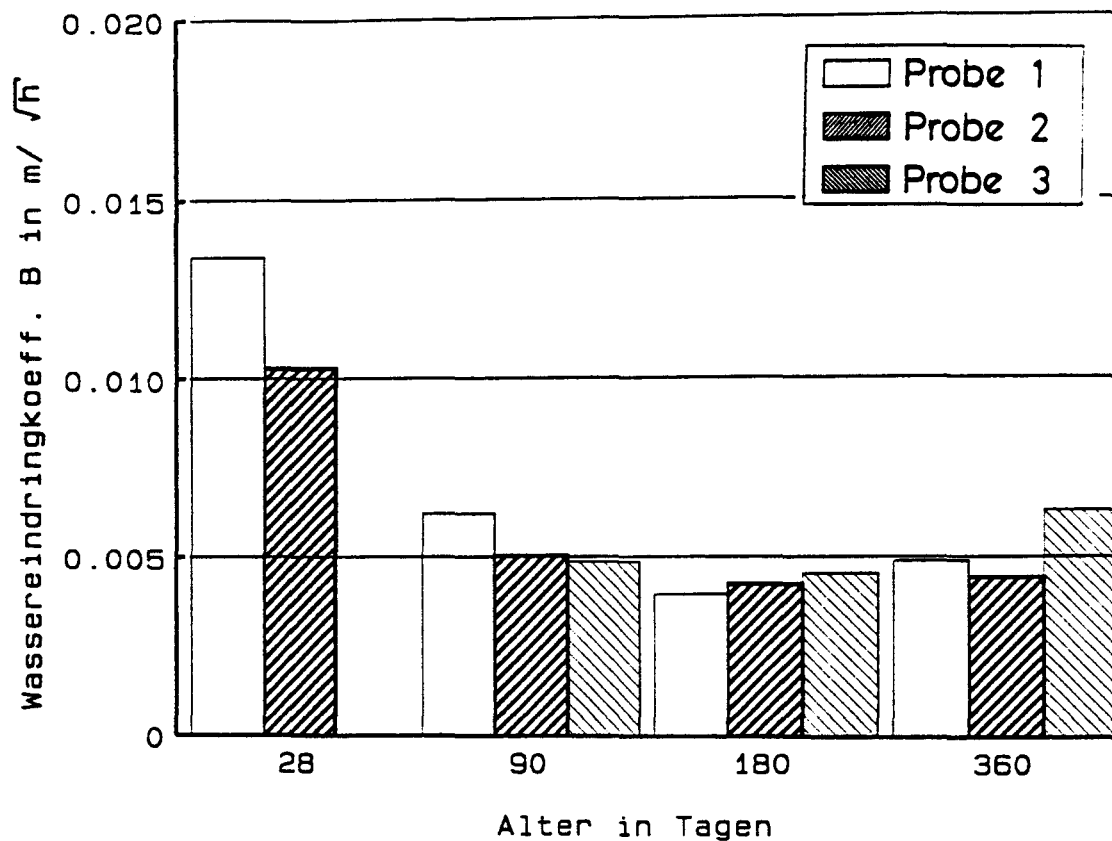


Bild 4.6.43 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand III. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

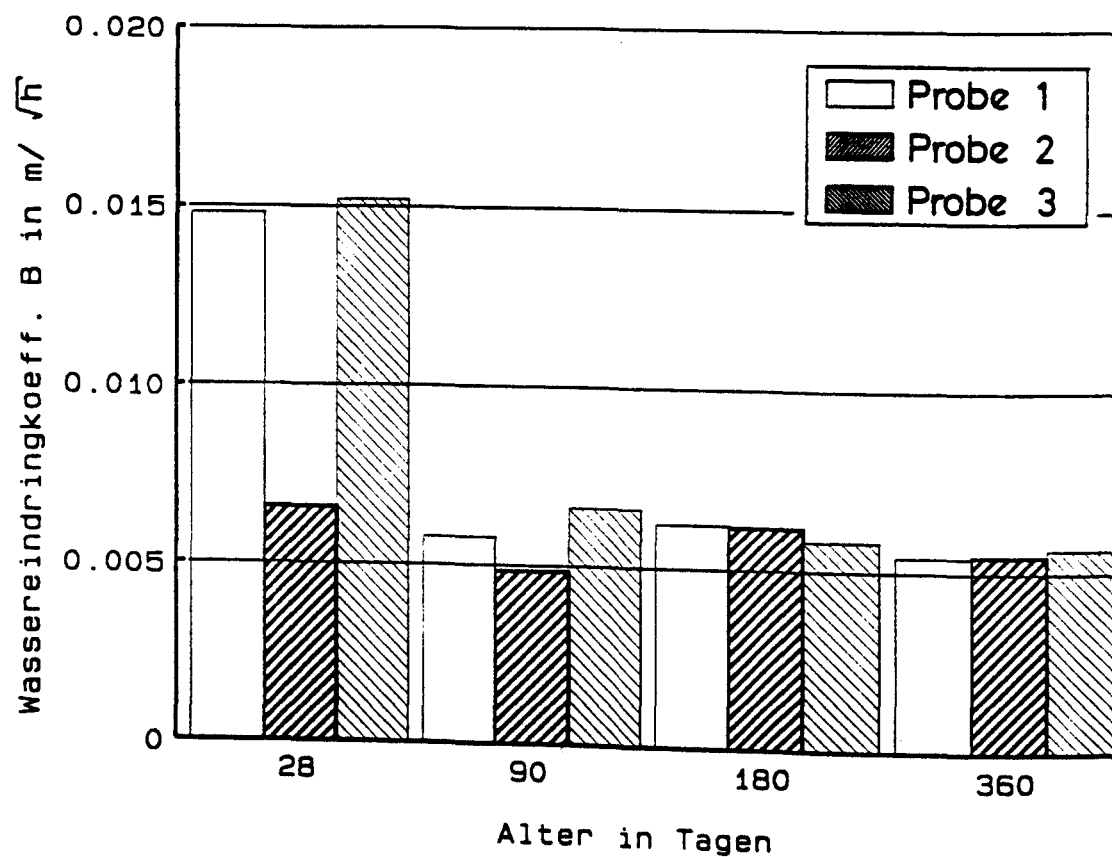


Bild 4.6.44 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand IV. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

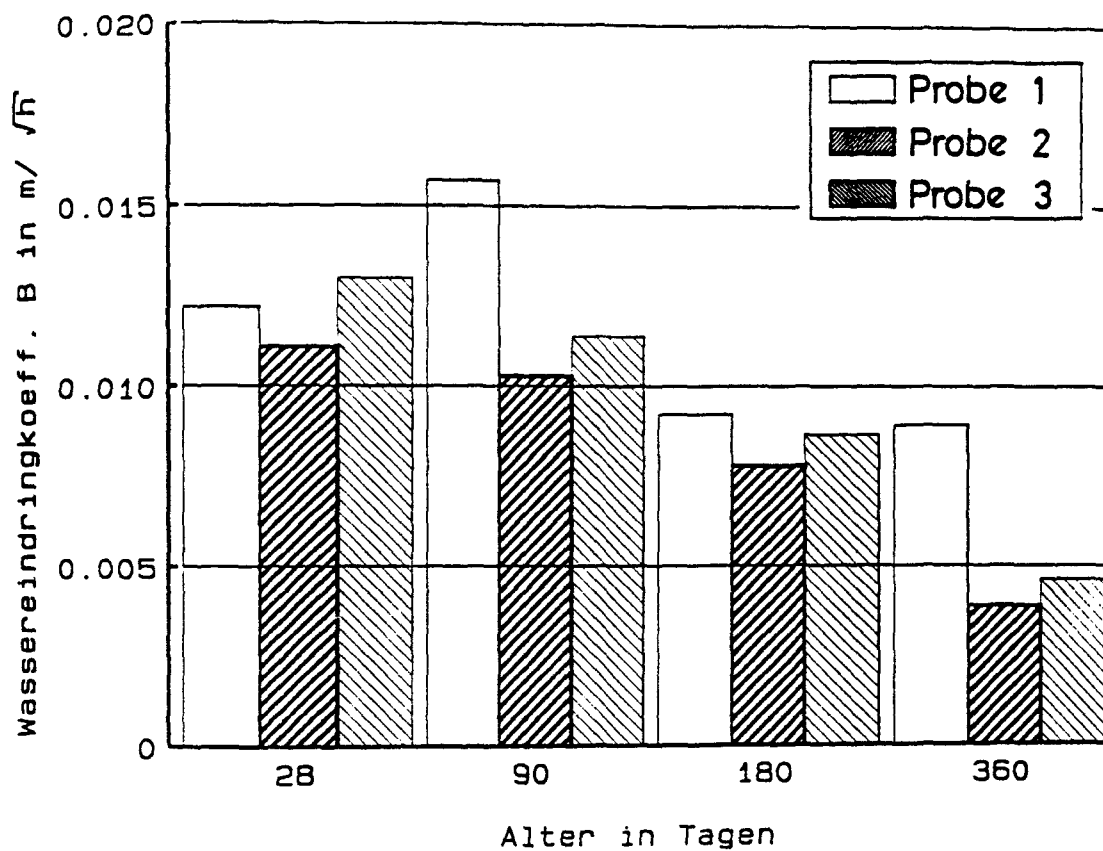


Bild 4.6.45 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand V. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

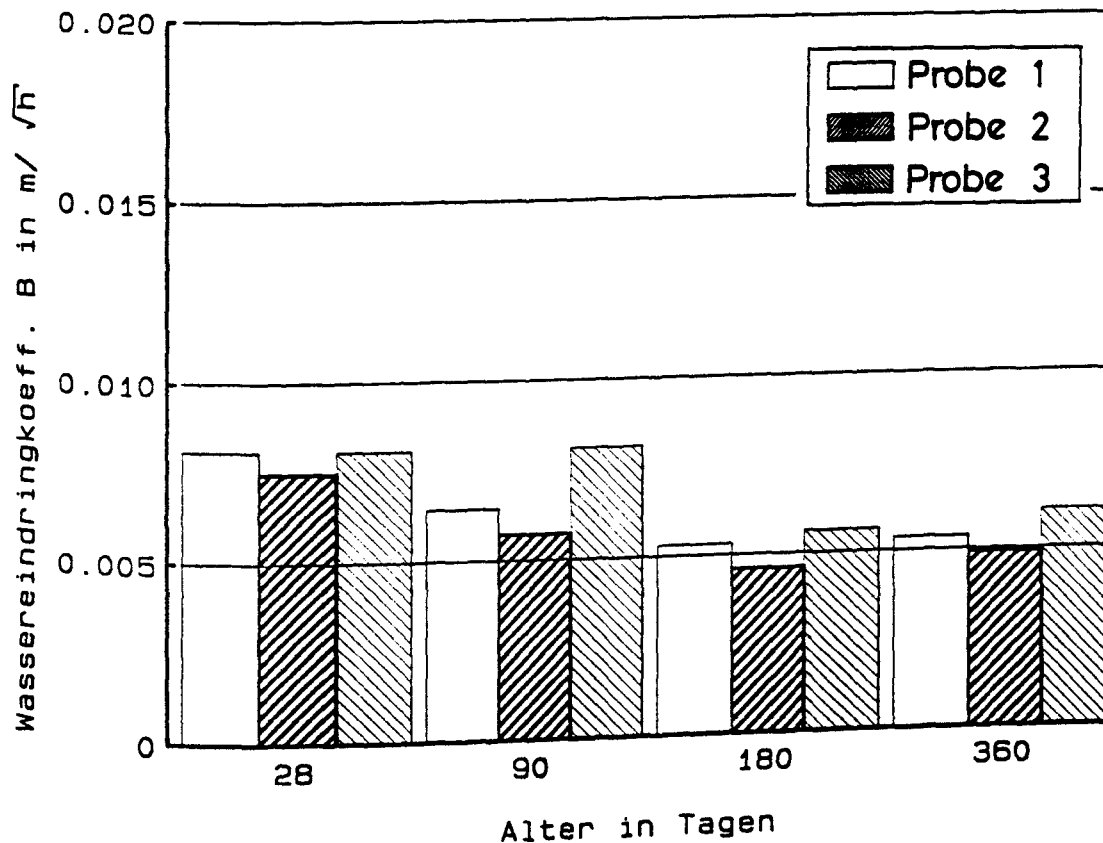


Bild 4.6.46 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand VI. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

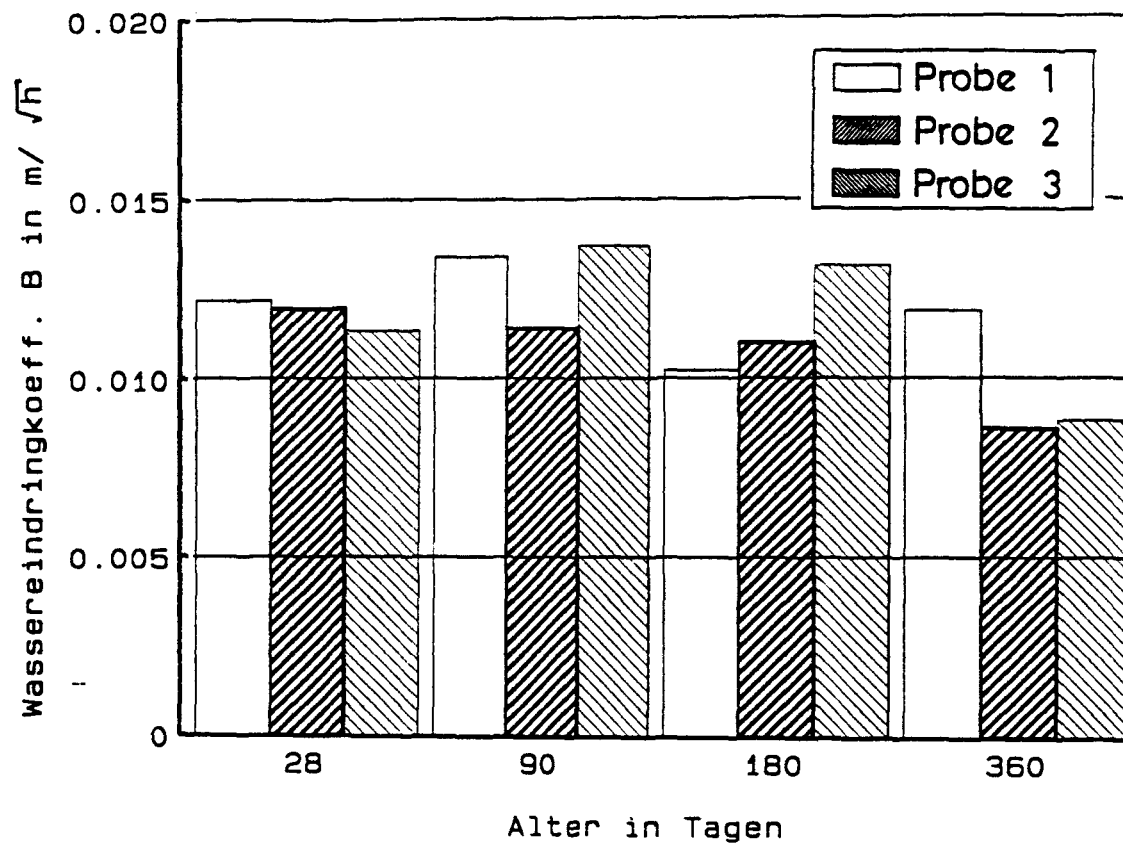


Bild 4.6.47 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand VII. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

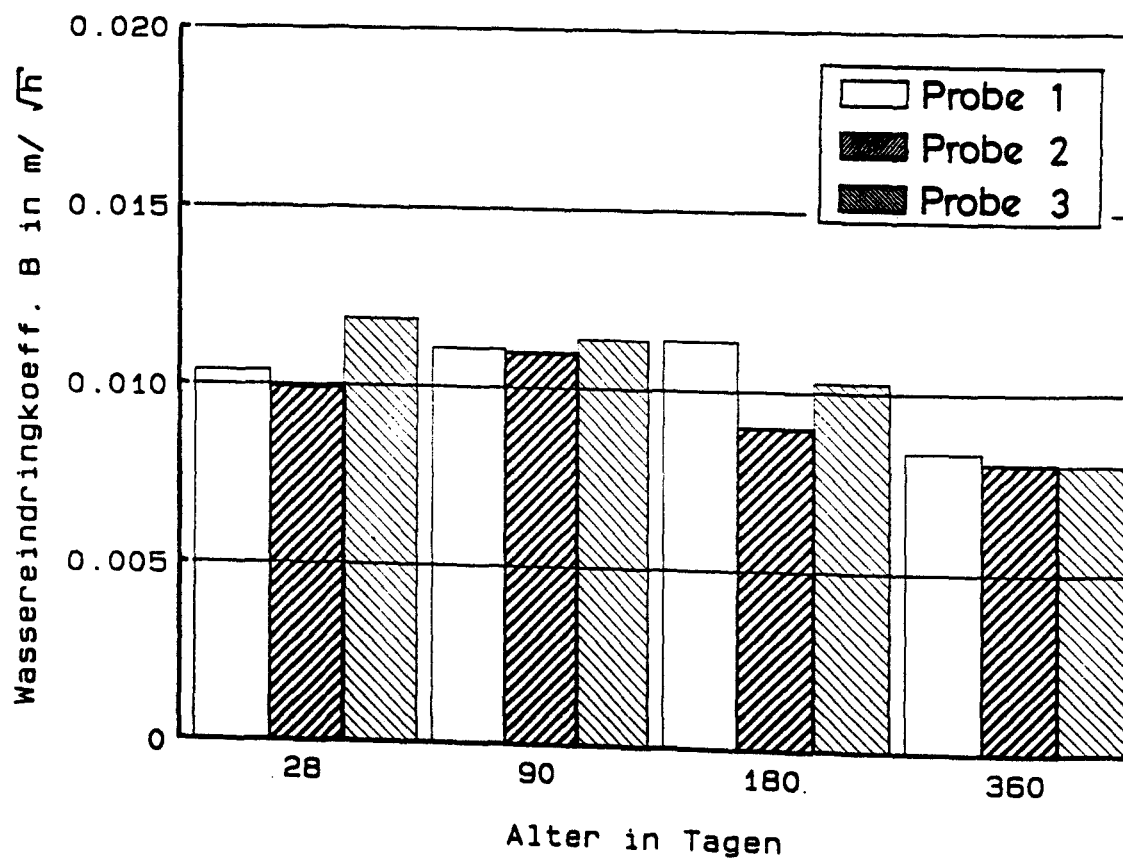


Bild 4.6.48 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand VIII. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

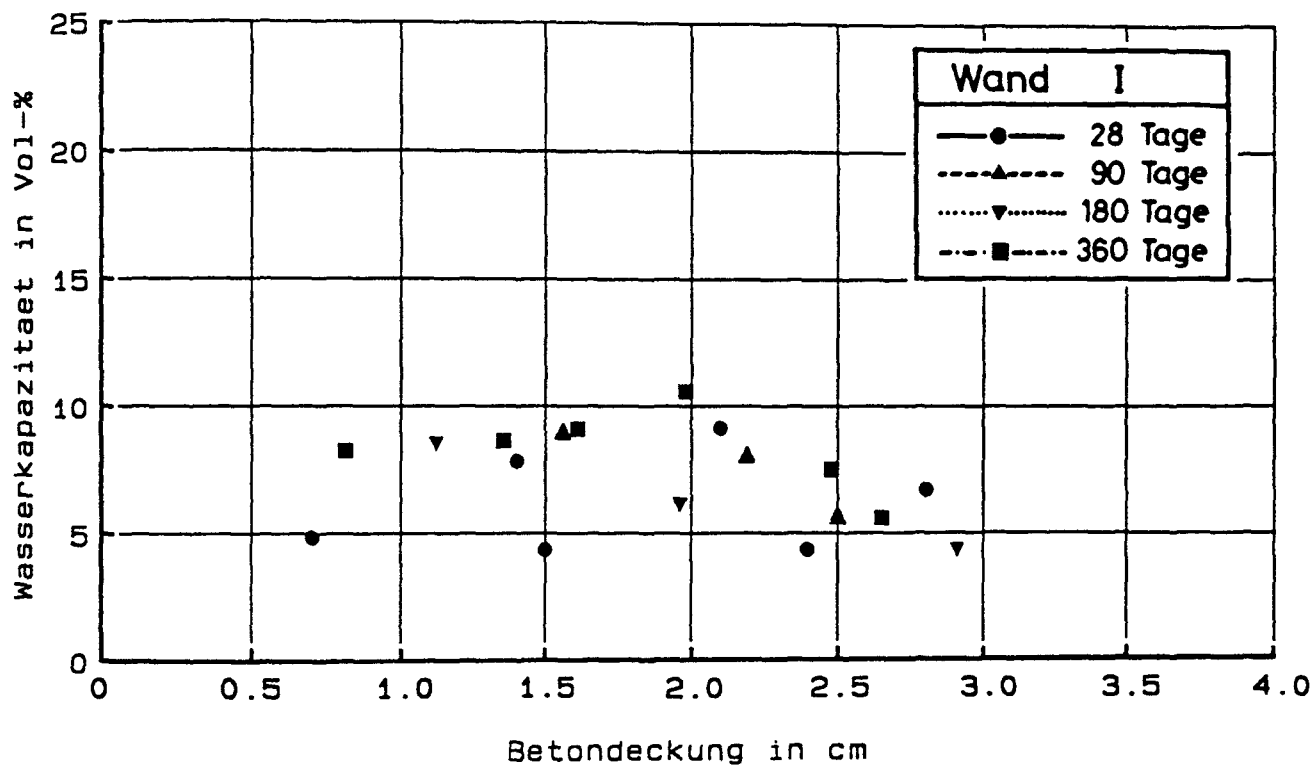


Bild 4.6.49 : Abhängigkeit der Wasserkapazität von der Dicke der Betondeckung für Wand I.

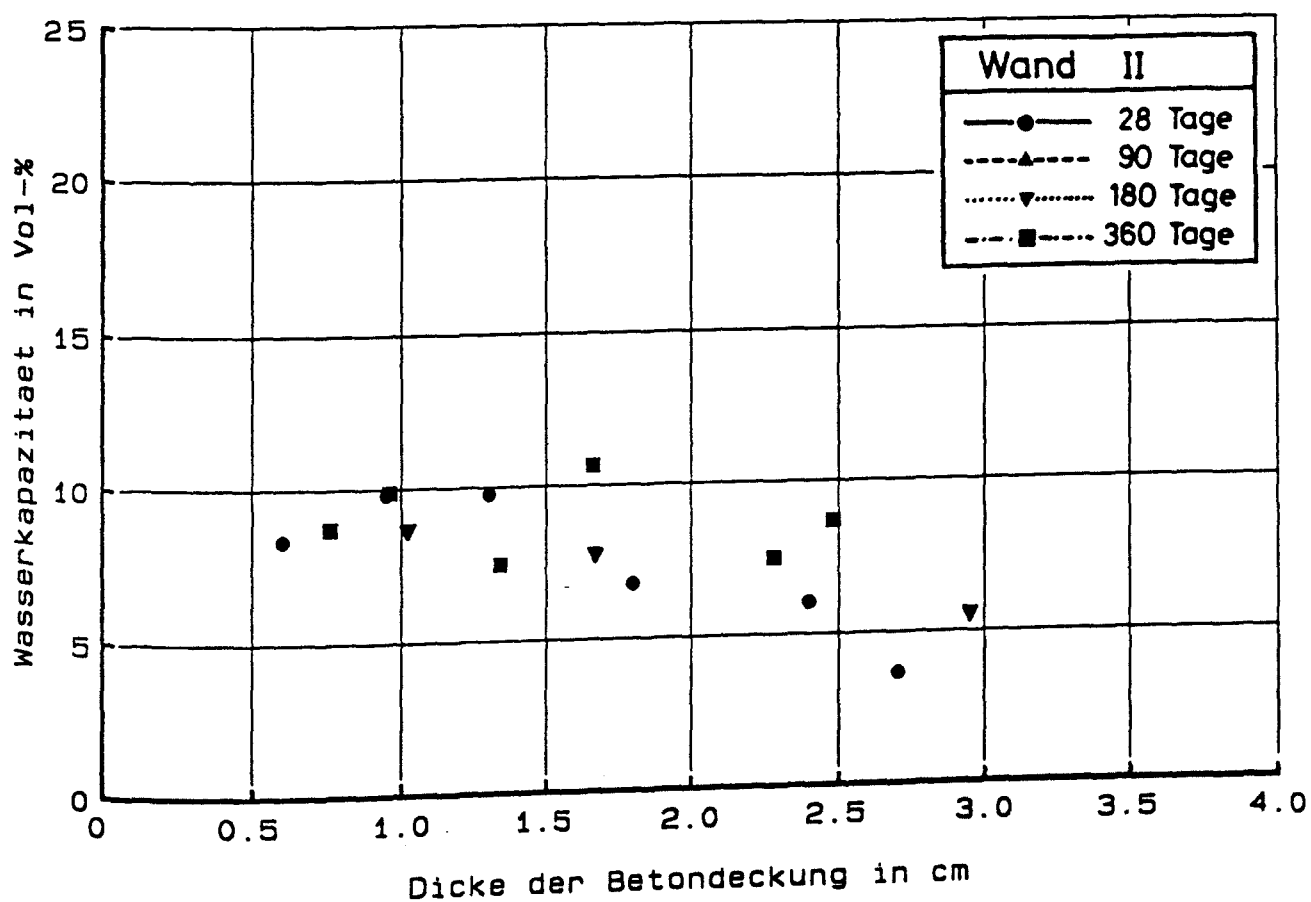


Bild 4.6.50 : Abhängigkeit der Wasserkapazität von der Dicke der Betondeckung für Wand II.

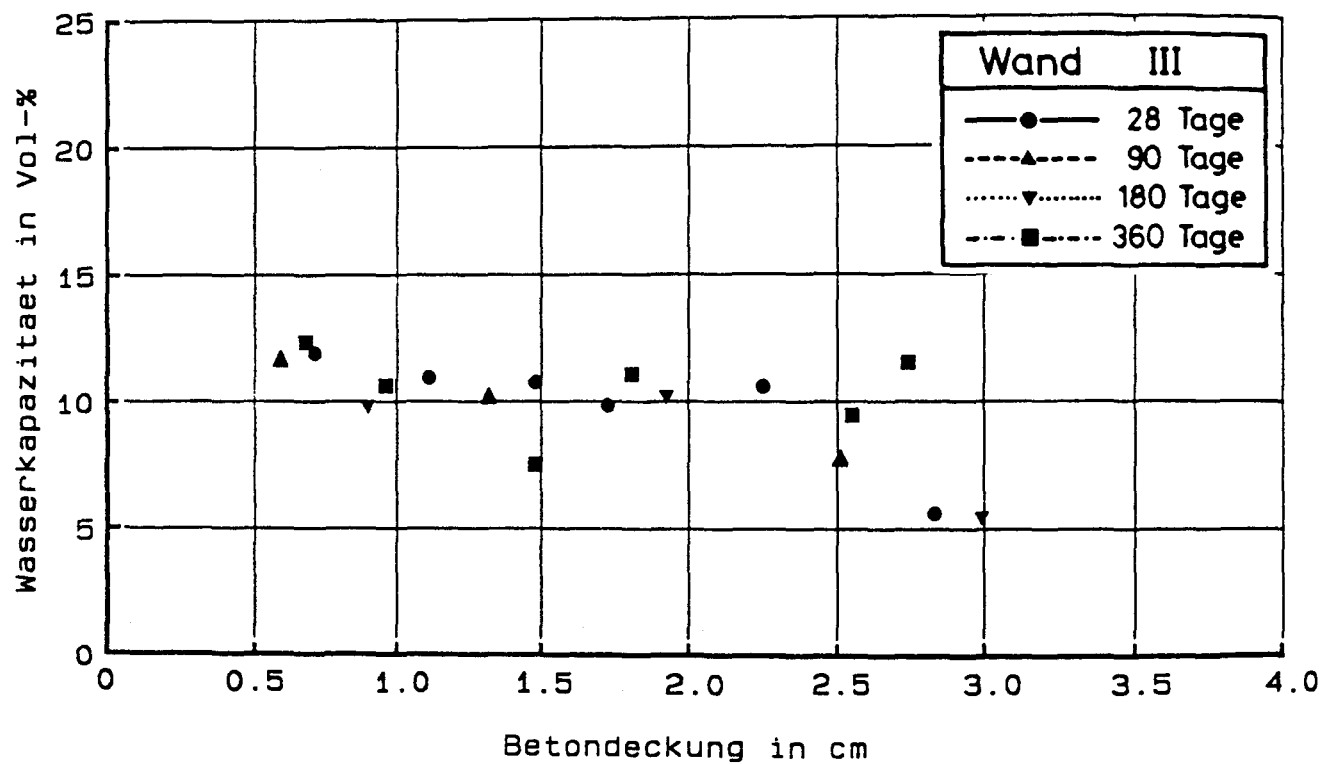


Bild 4.6.51 : Abhängigkeit der Wasserkapazität von der Dicke der Betondeckung für Wand III.

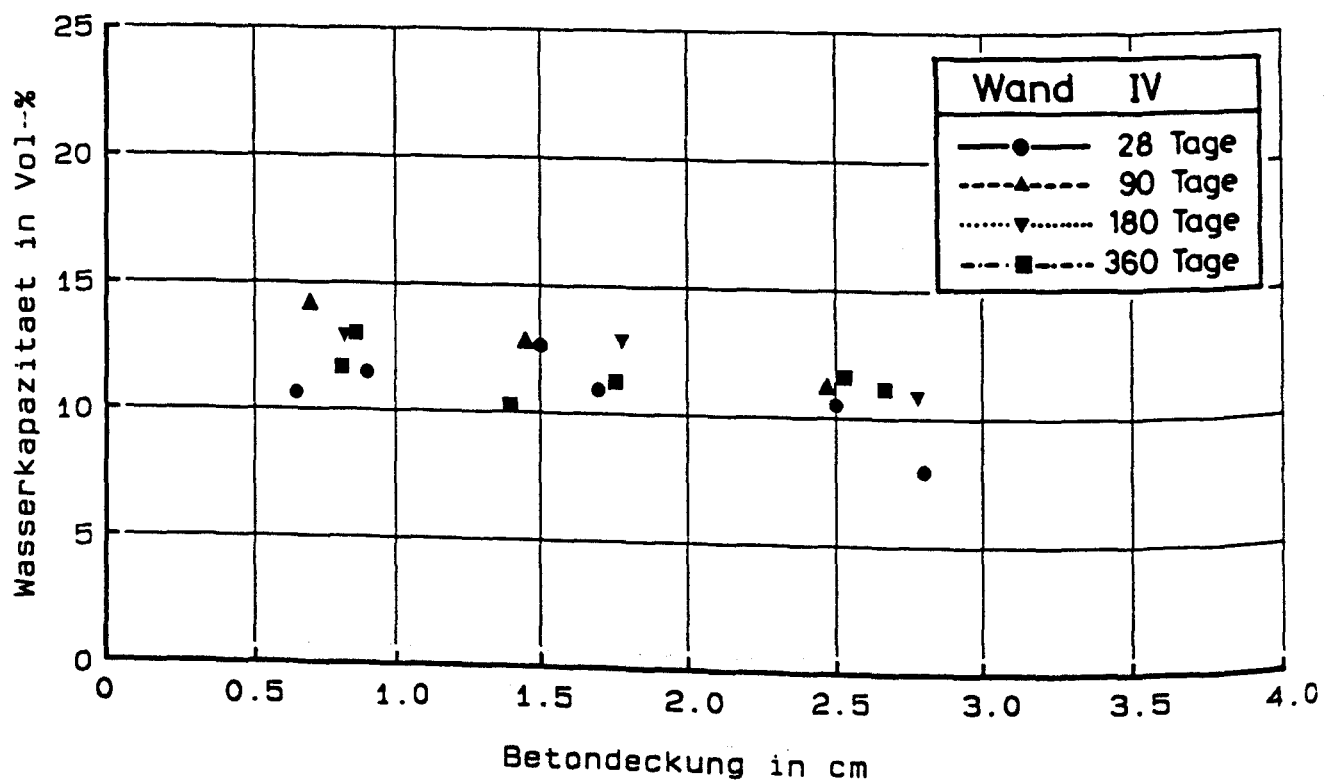


Bild 4.6.52 : Abhängigkeit der Wasserkapazität von der Dicke der Betondeckung für Wand IV.

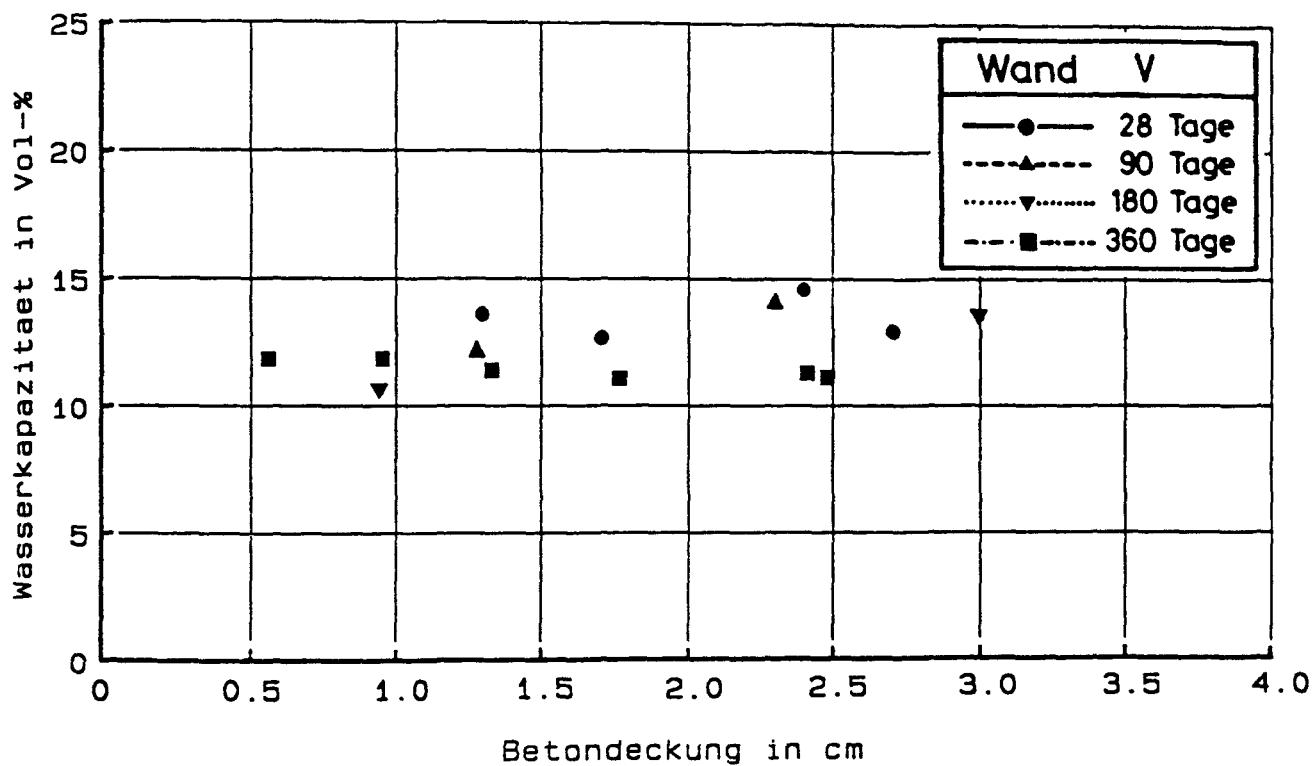


Bild 4.6.53 : Abhängigkeit der Wasserkapazität von der Dicke der Betondeckung für Wand V.

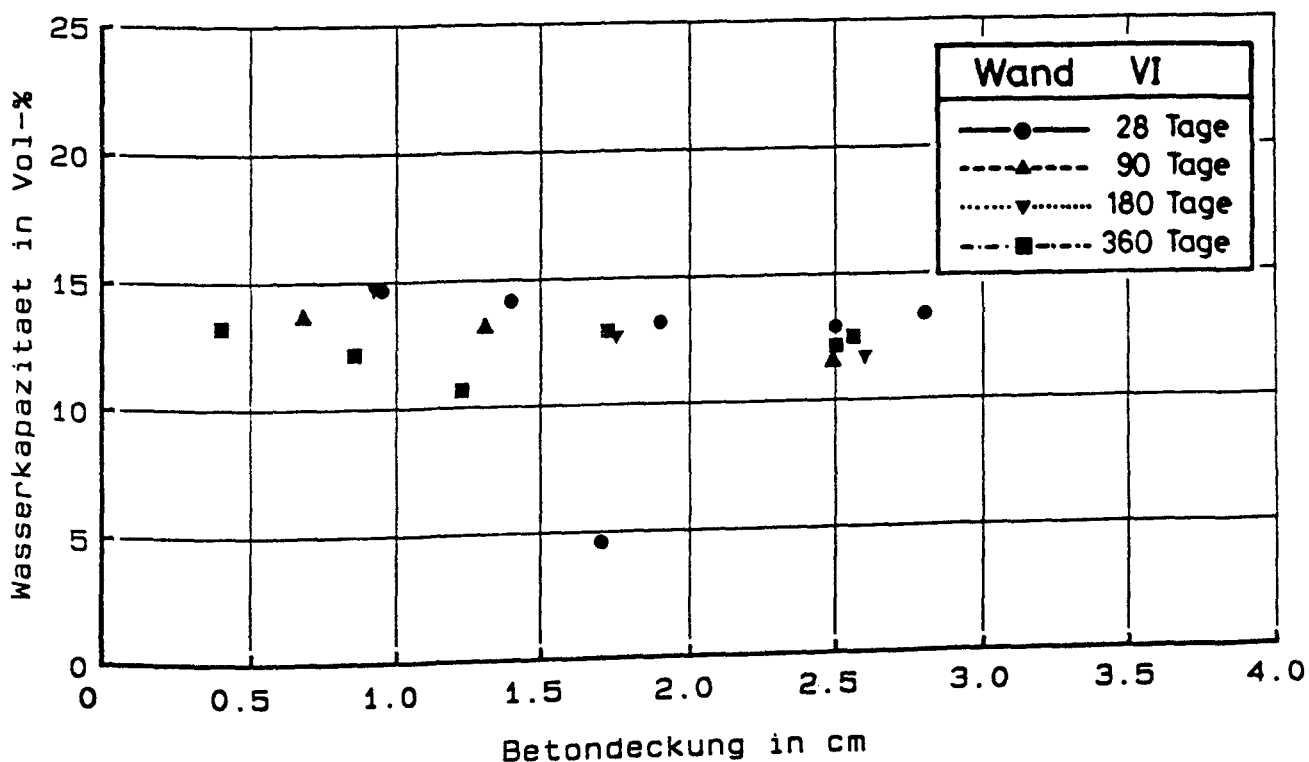


Bild 4.6.54 : Abhängigkeit der Wasserkapazität von der Dicke der Betondeckung für Wand VI.

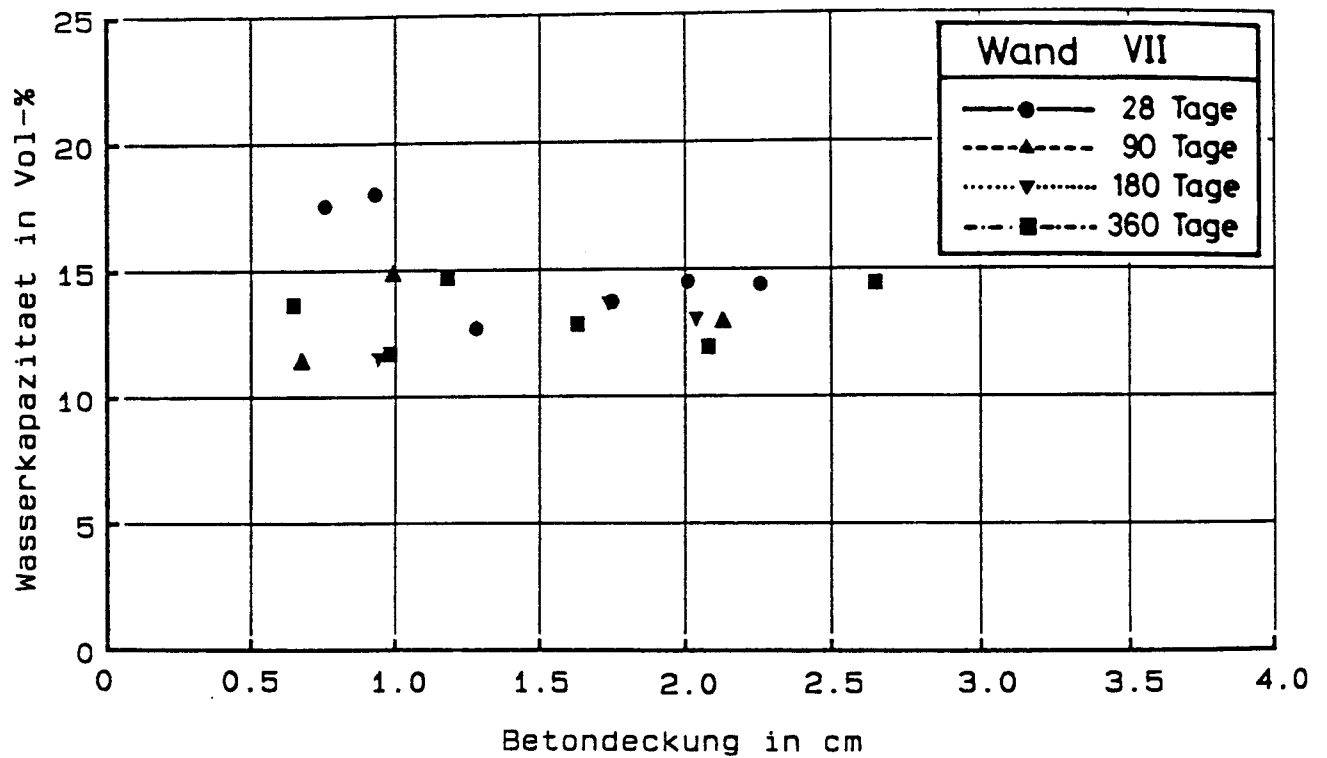


Bild 4.6.55 : Abhängigkeit der Wasserkapazität von der Dicke der Betondeckung für Wand VII.

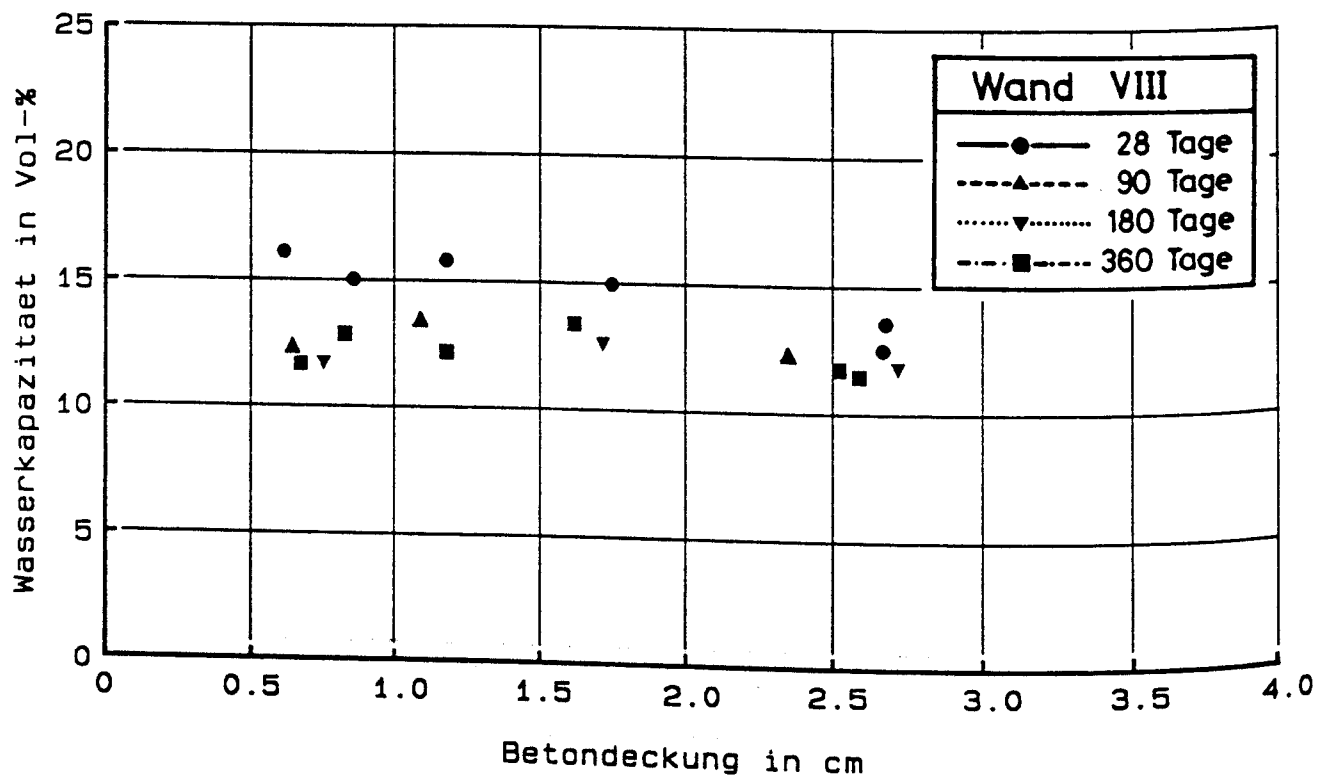


Bild 4.6.56 : Abhängigkeit der Wasserkapazität von der Dicke der Betondeckung für Wand VIII.

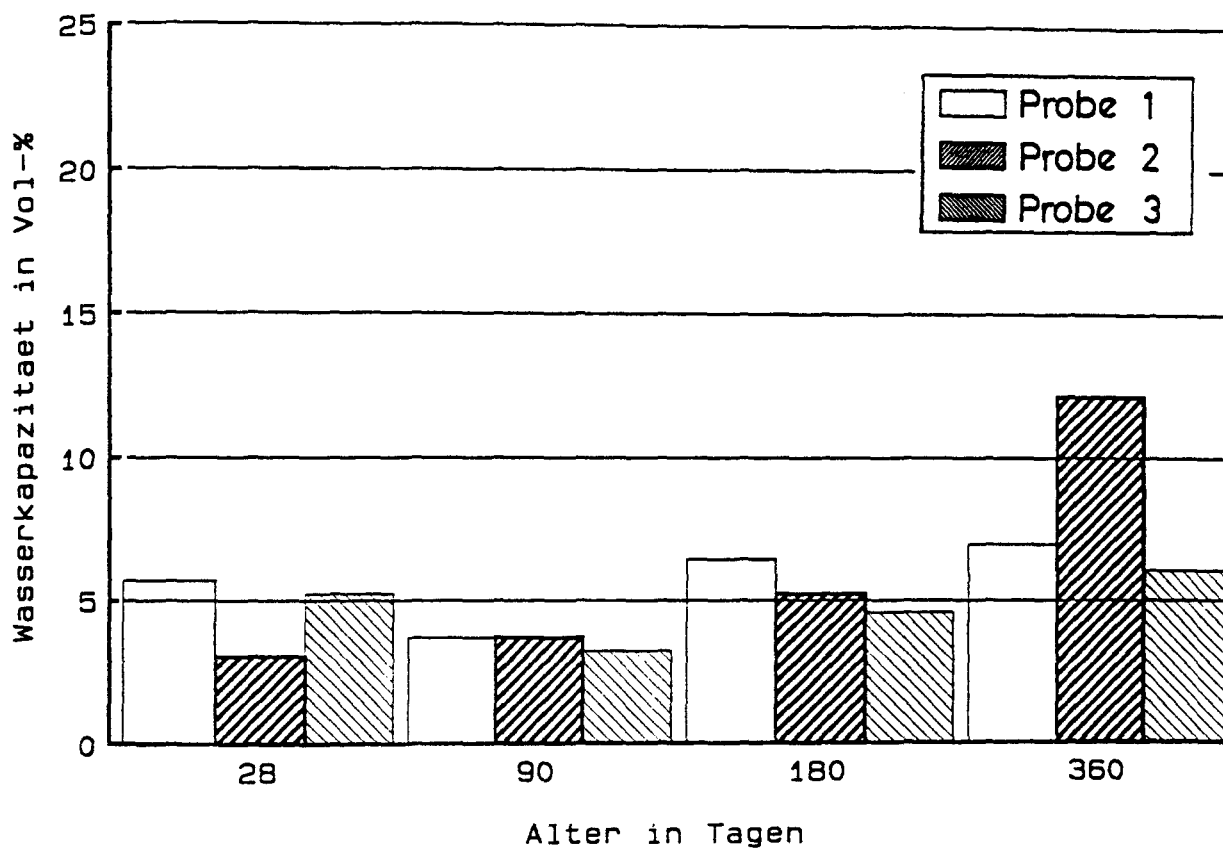


Bild 4.6.57 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand I. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

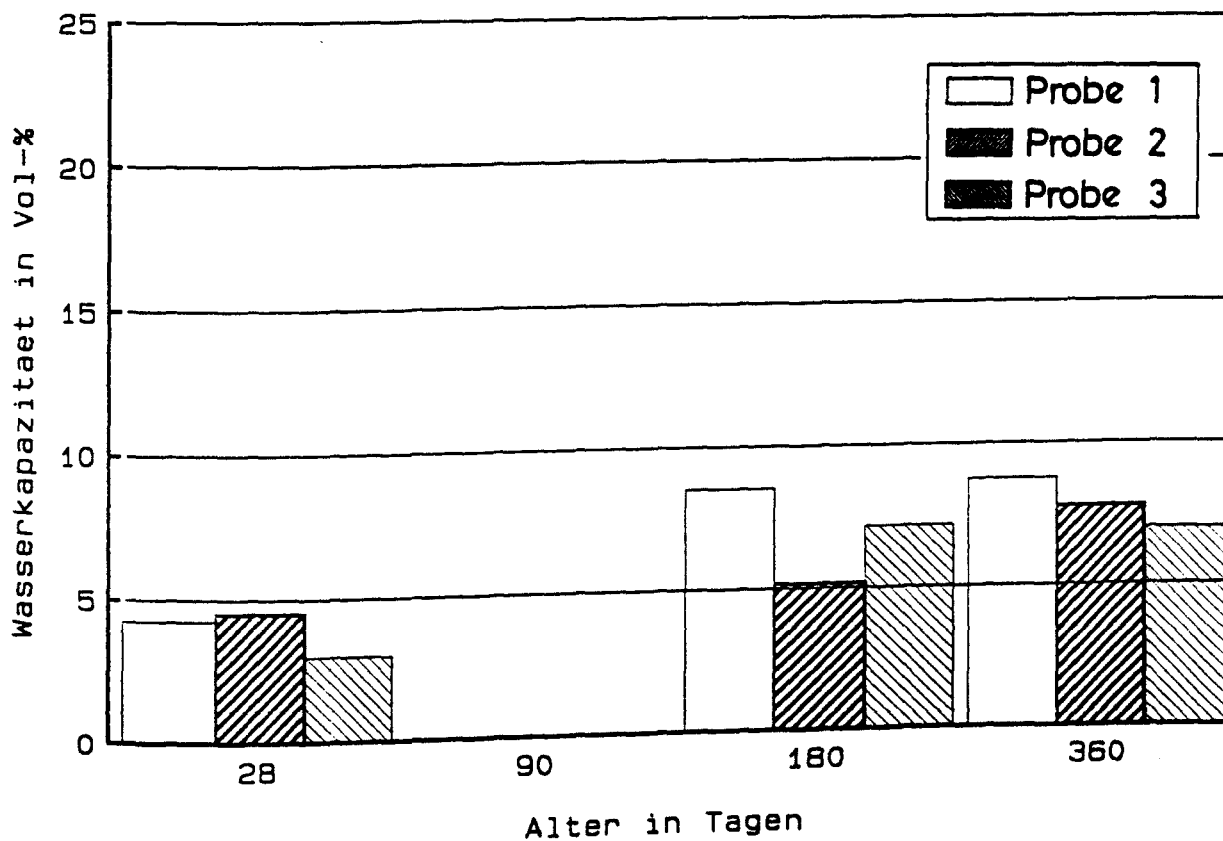


Bild 4.6.58 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand II. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

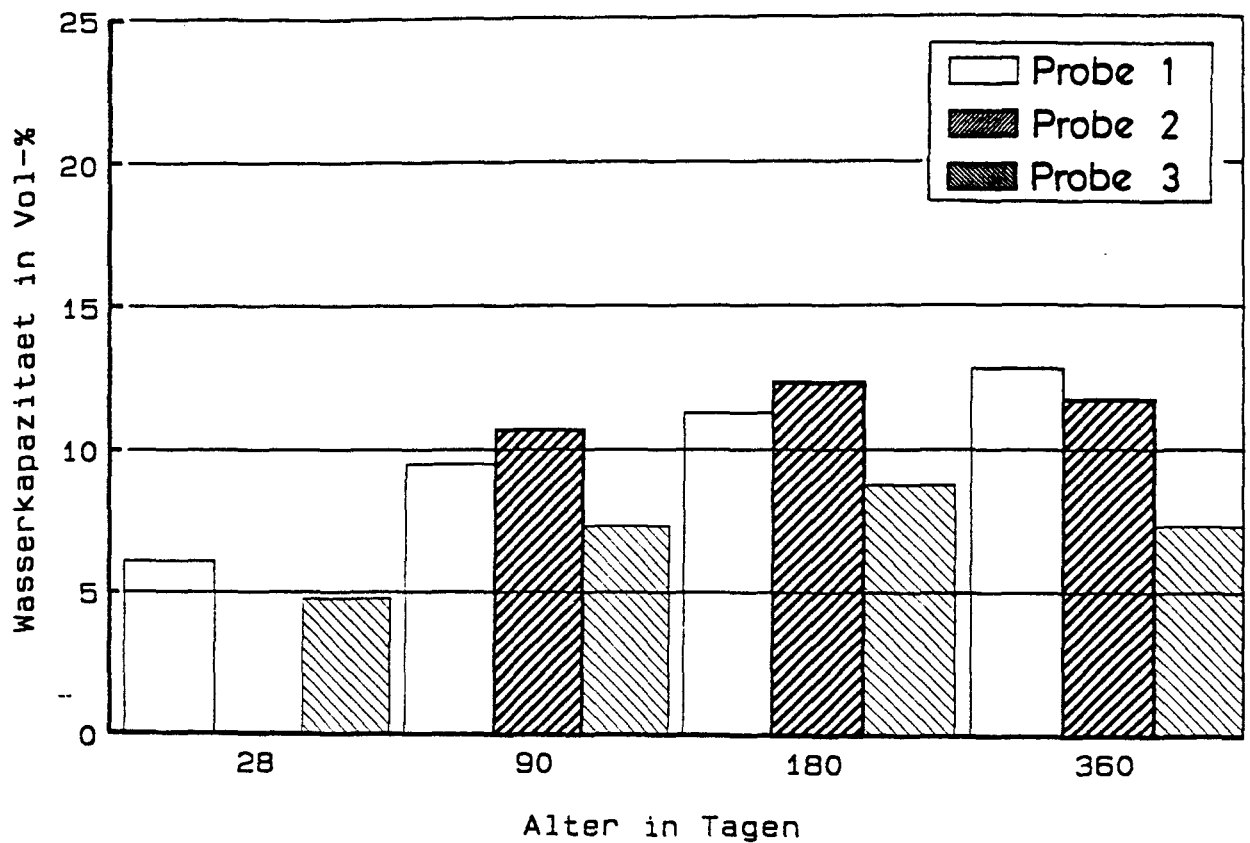


Bild 4.6.59 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand III. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

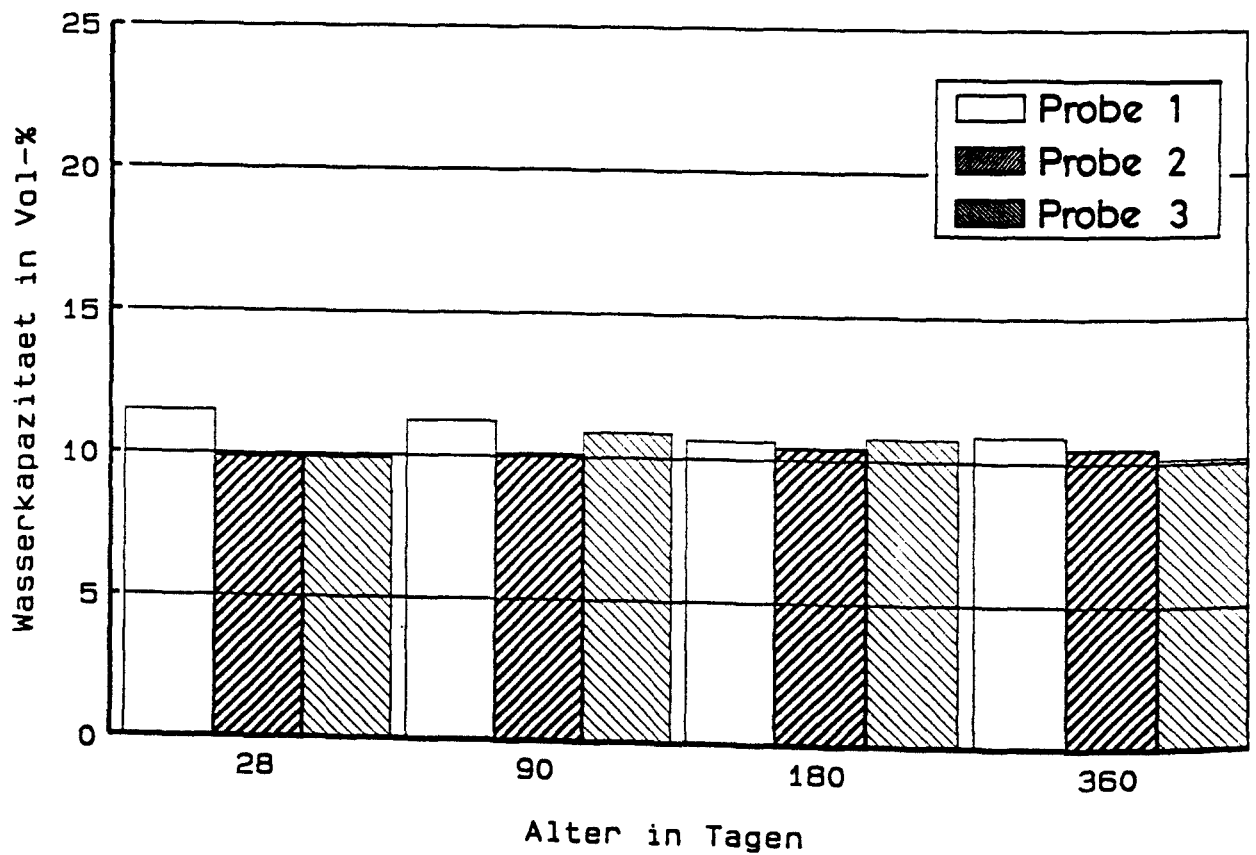


Bild 4.6.60 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand IV. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

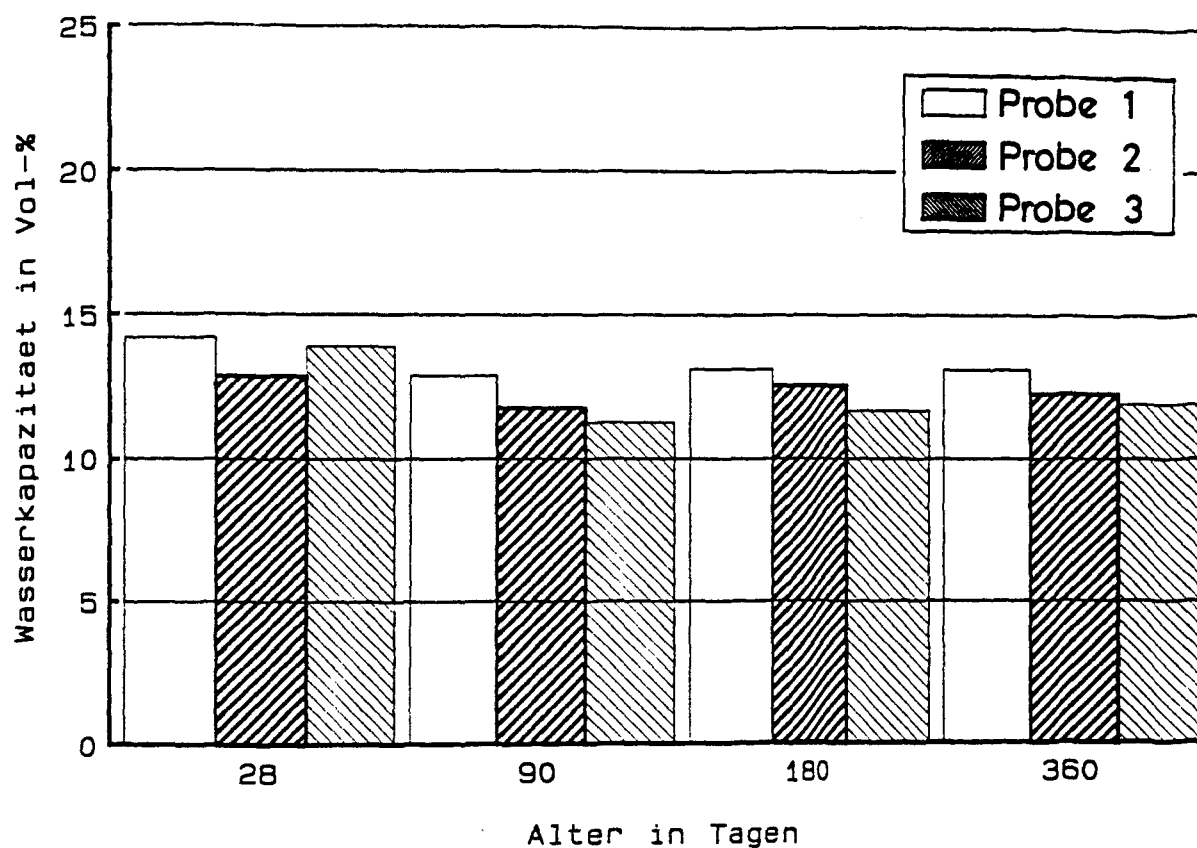


Bild 4.6.61 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand V. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

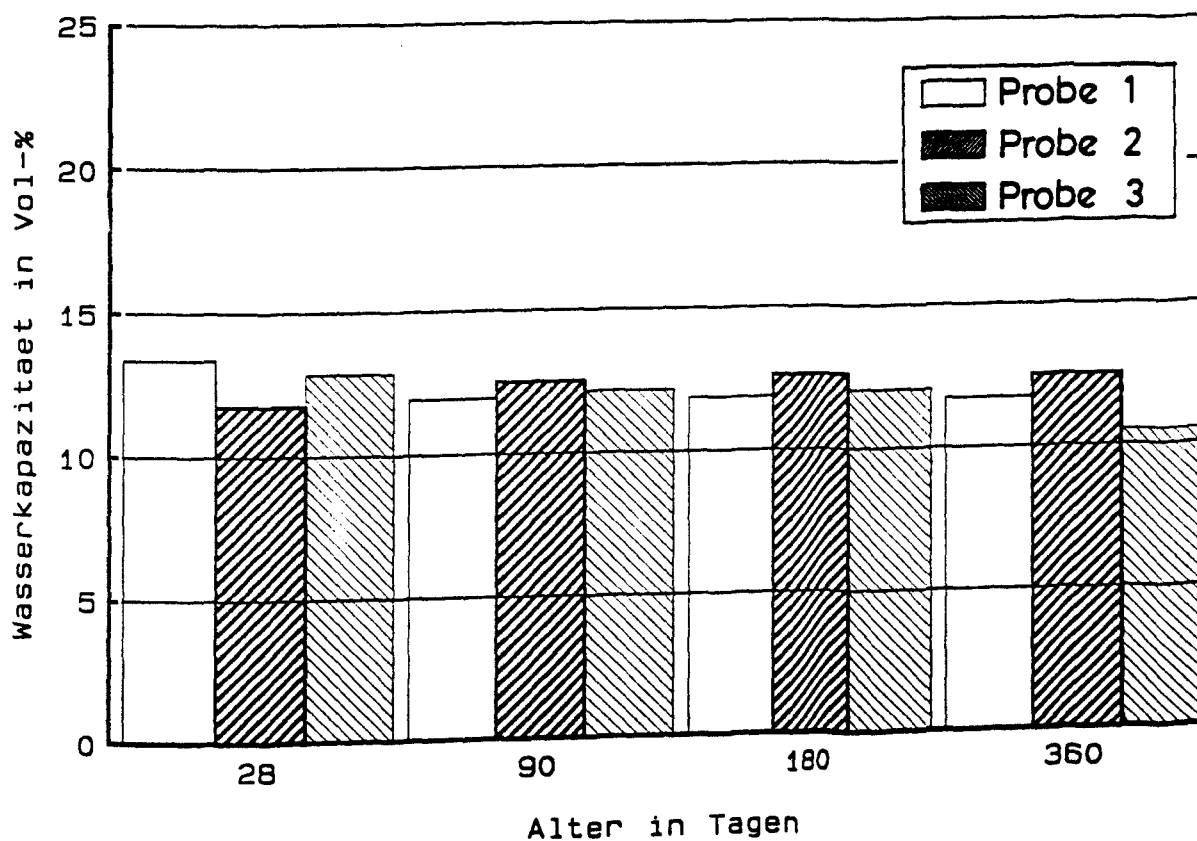


Bild 4.6.62 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand VI. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

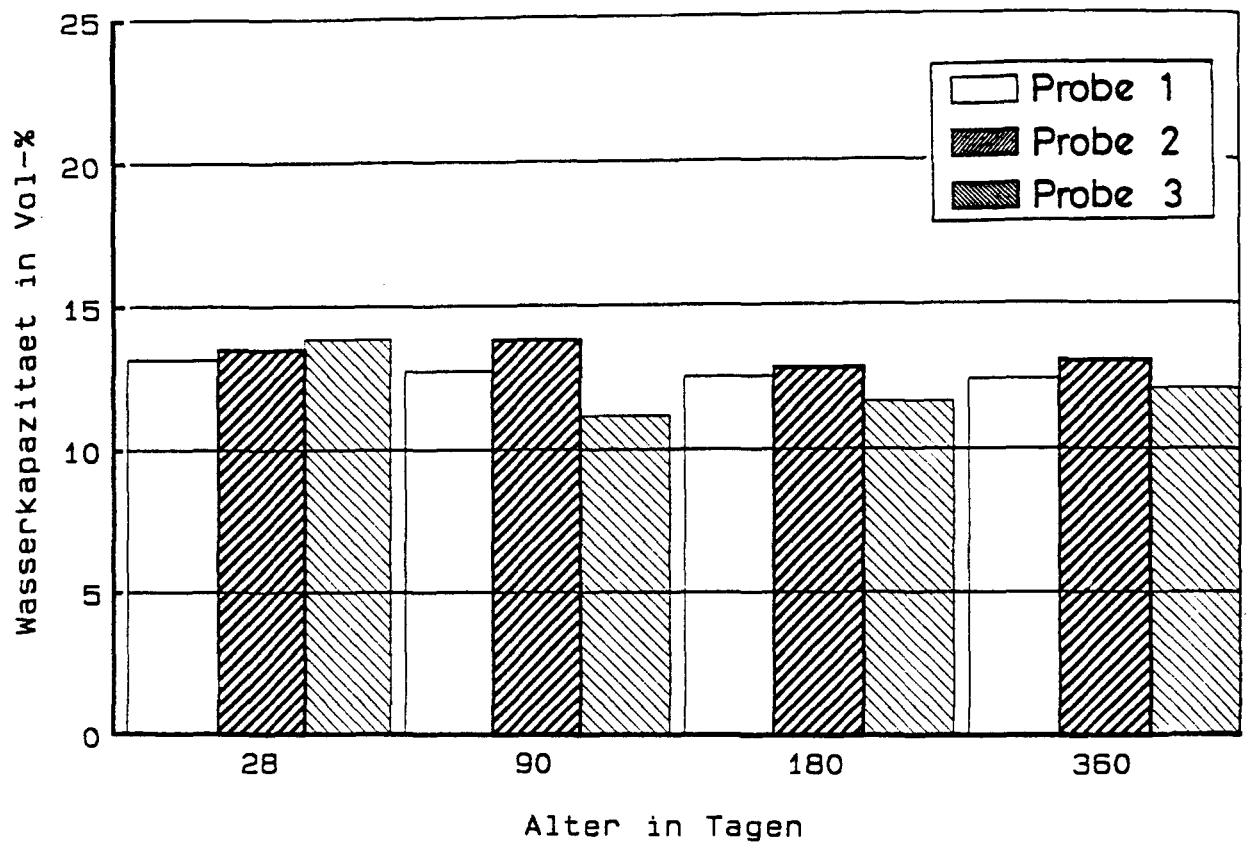


Bild 4.6.63 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand VII. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

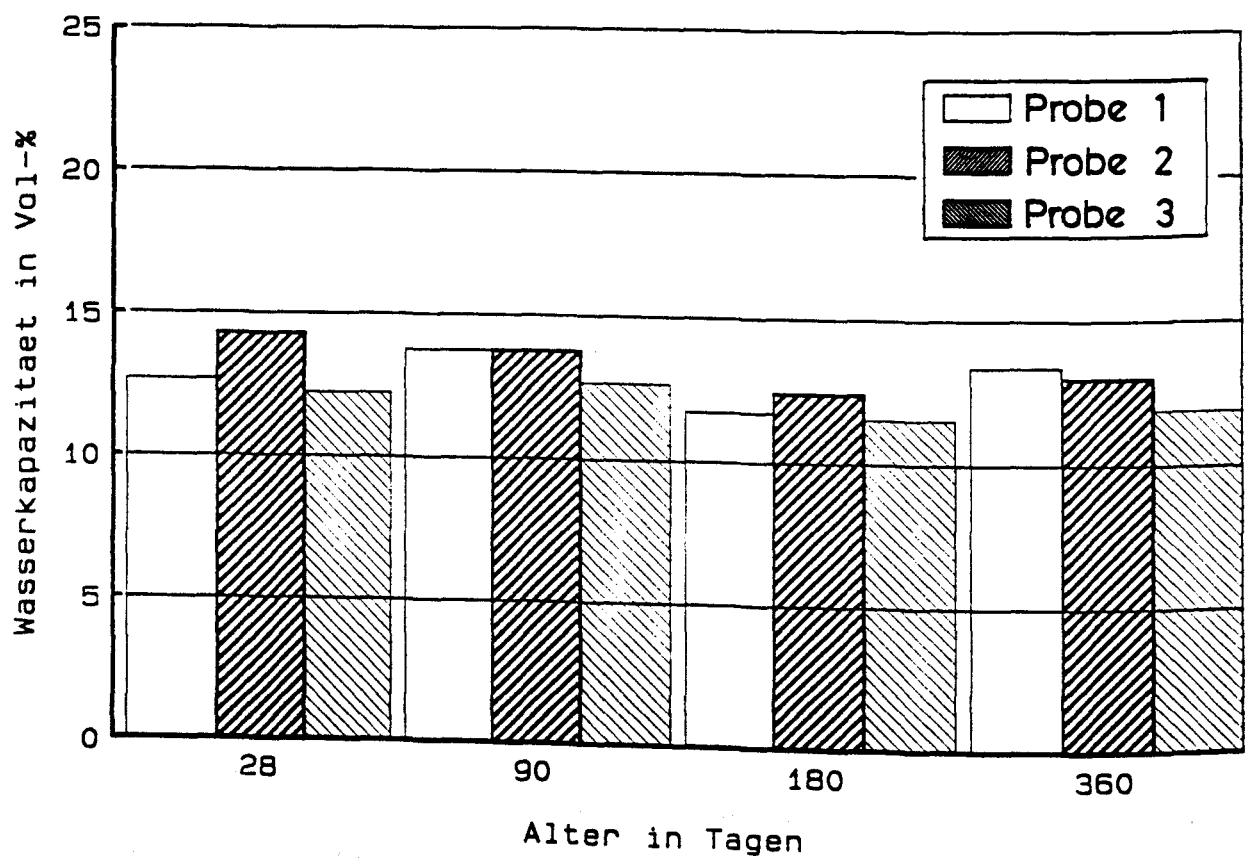


Bild 4.6.64 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand VIII. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

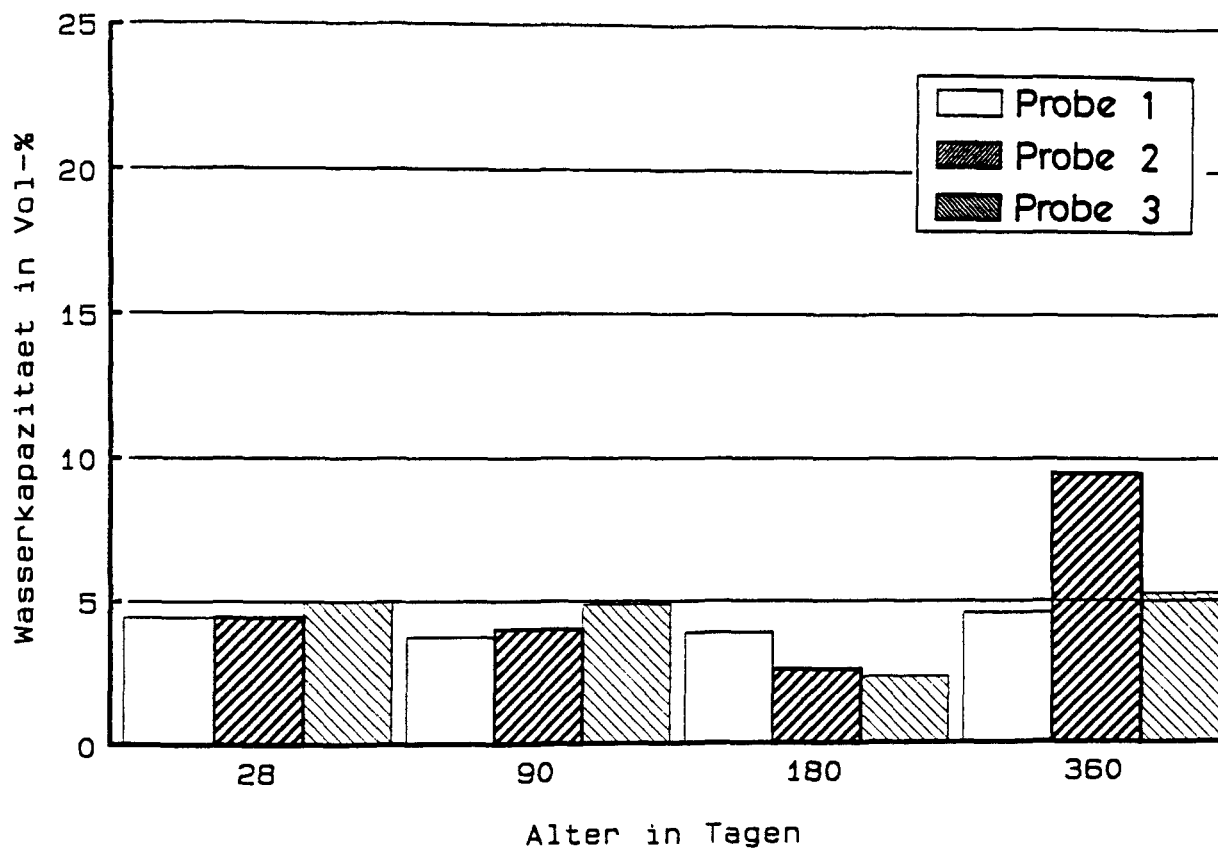


Bild 4.6.65 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand I. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

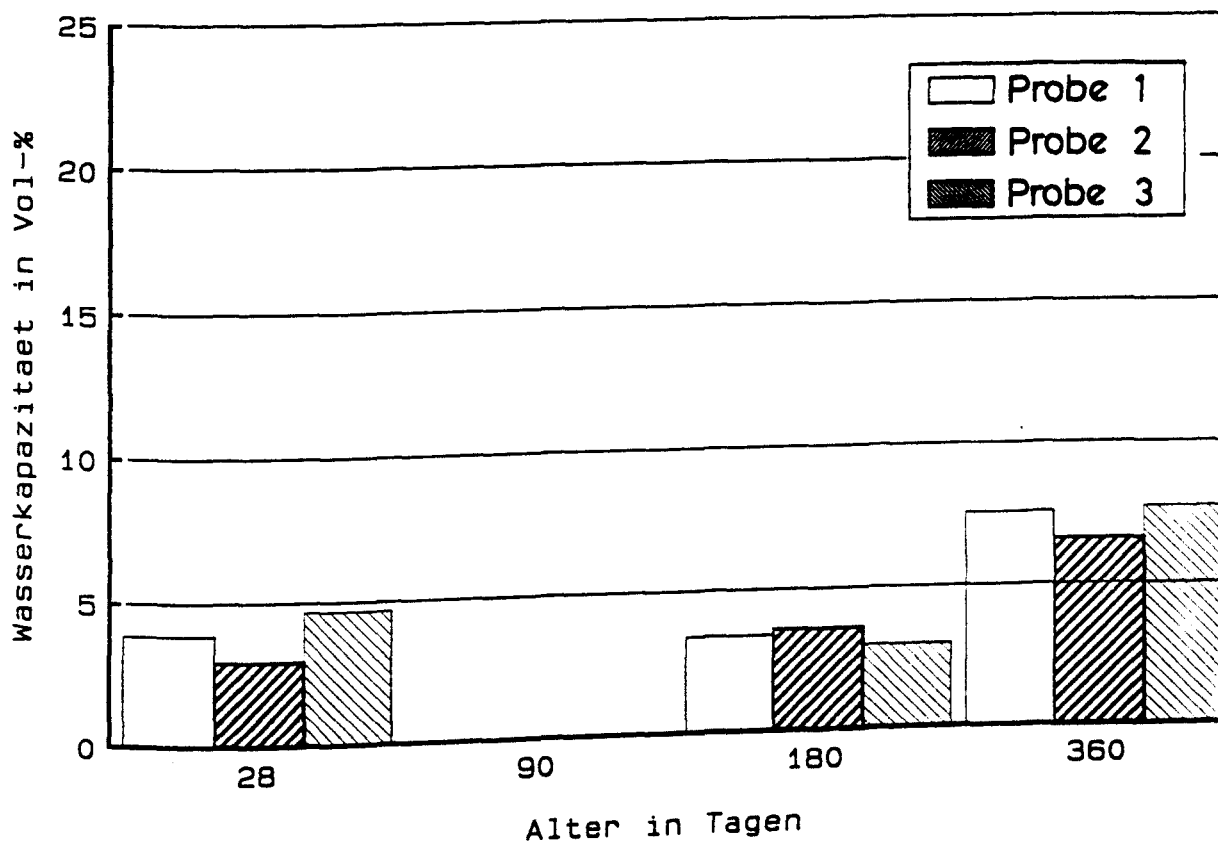


Bild 4.6.66 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand II. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

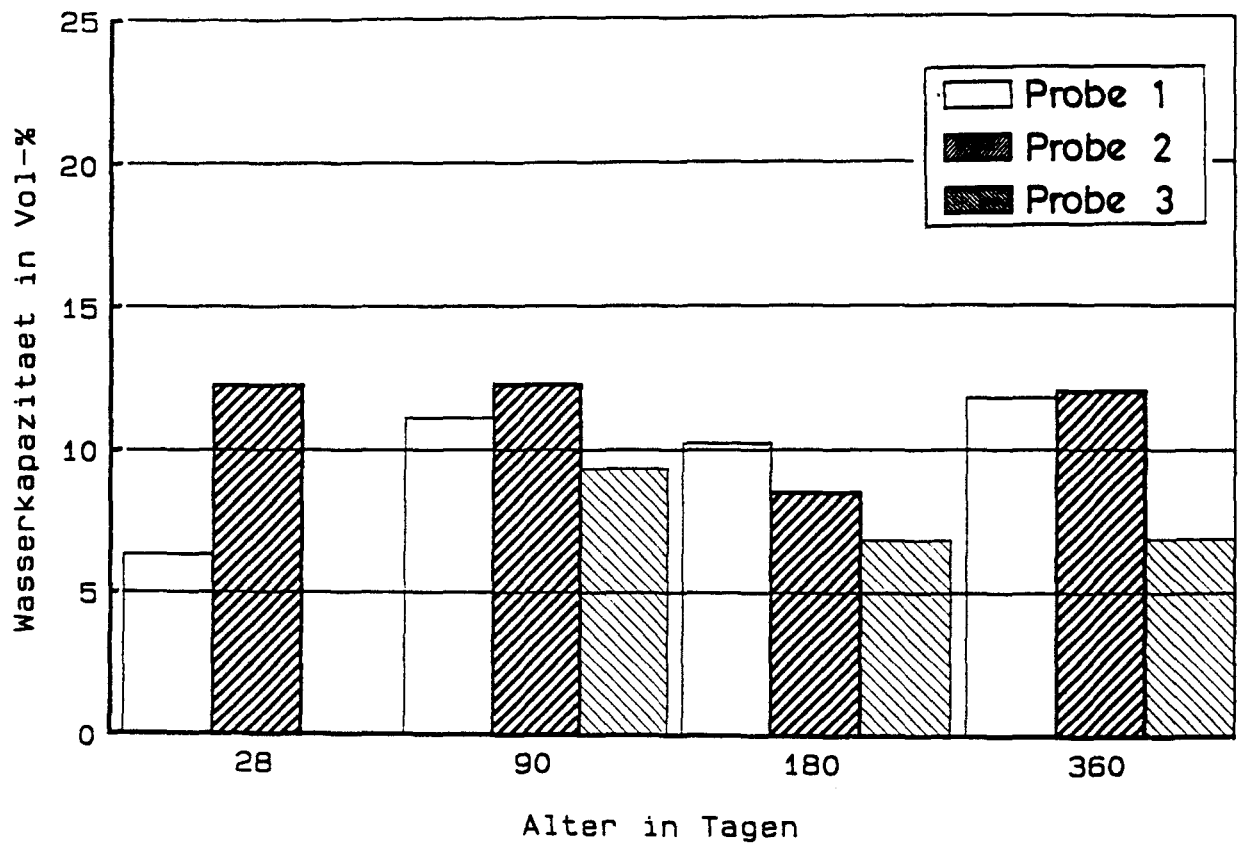


Bild 4.6.67 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand III. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

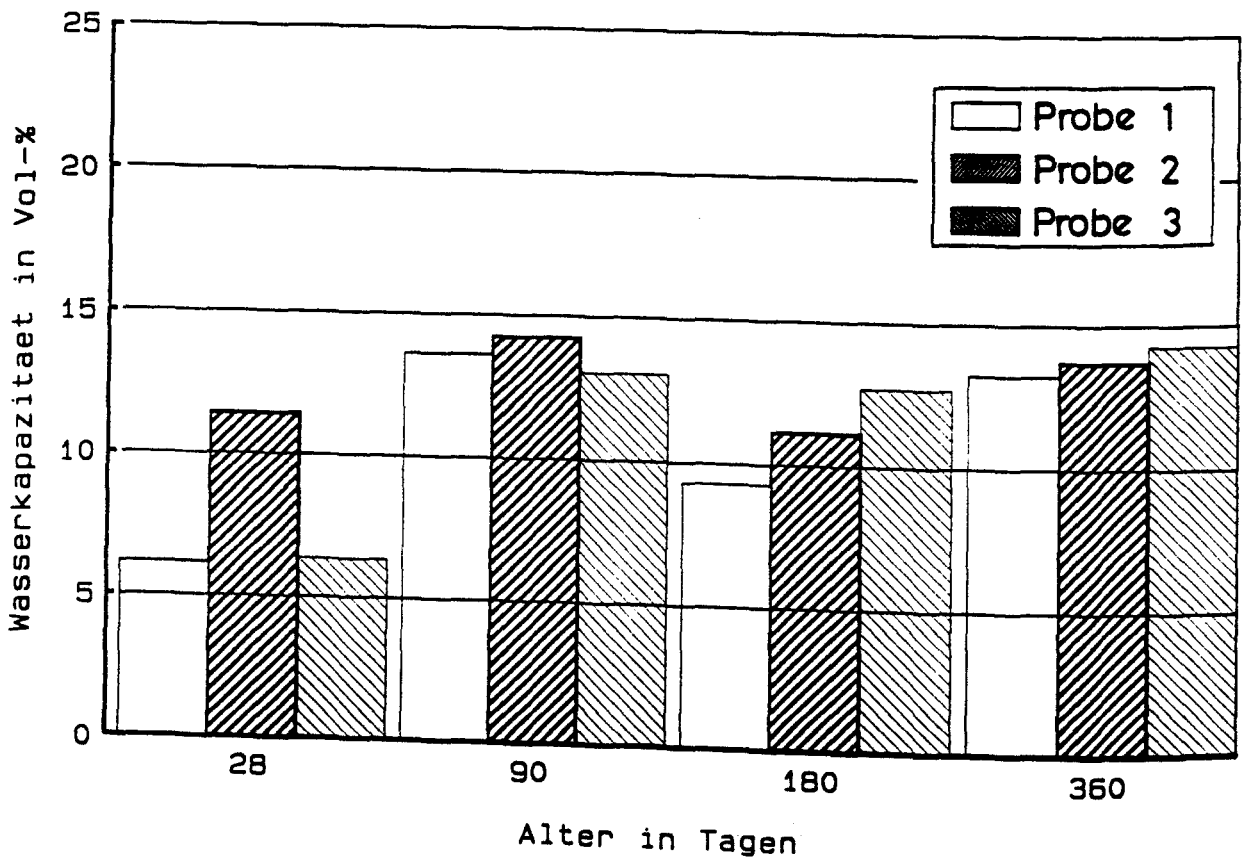


Bild 4.6.68 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand IV. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

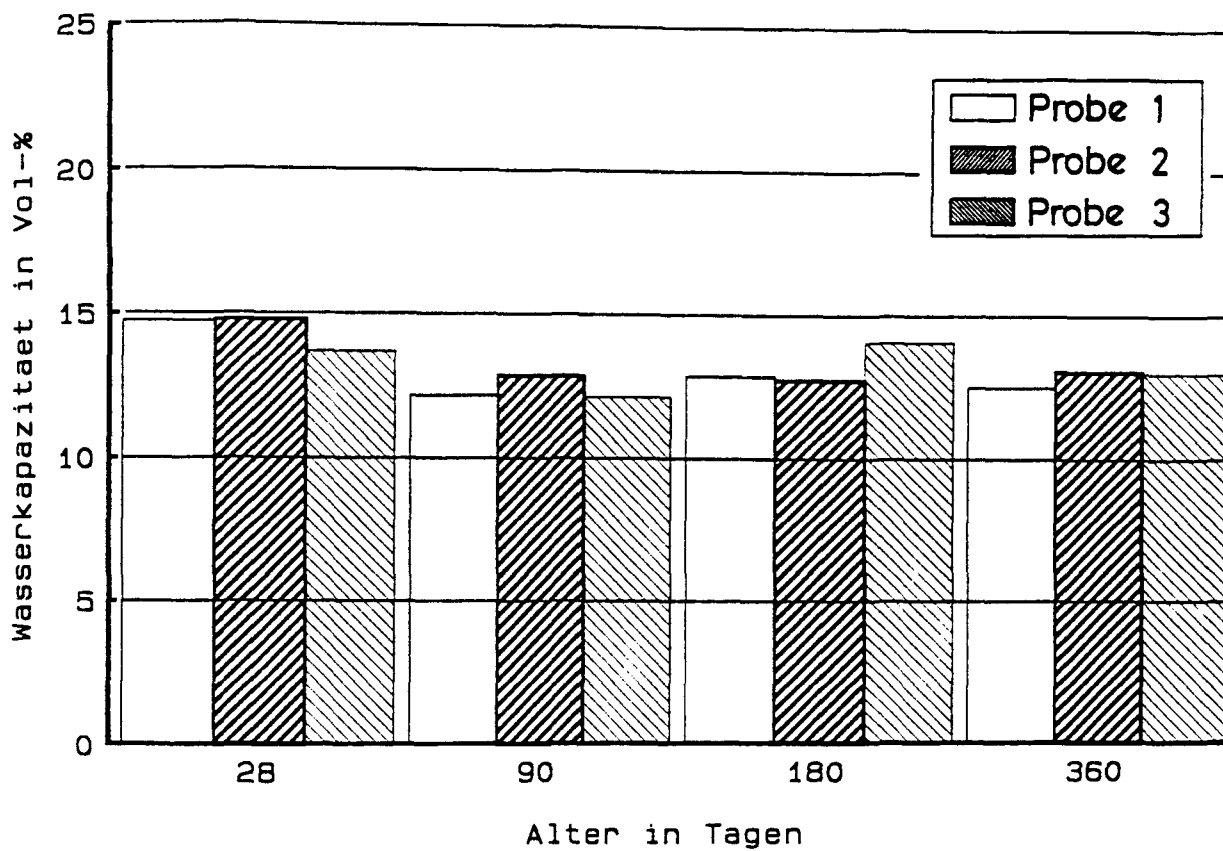


Bild 4.6.69 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand V. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

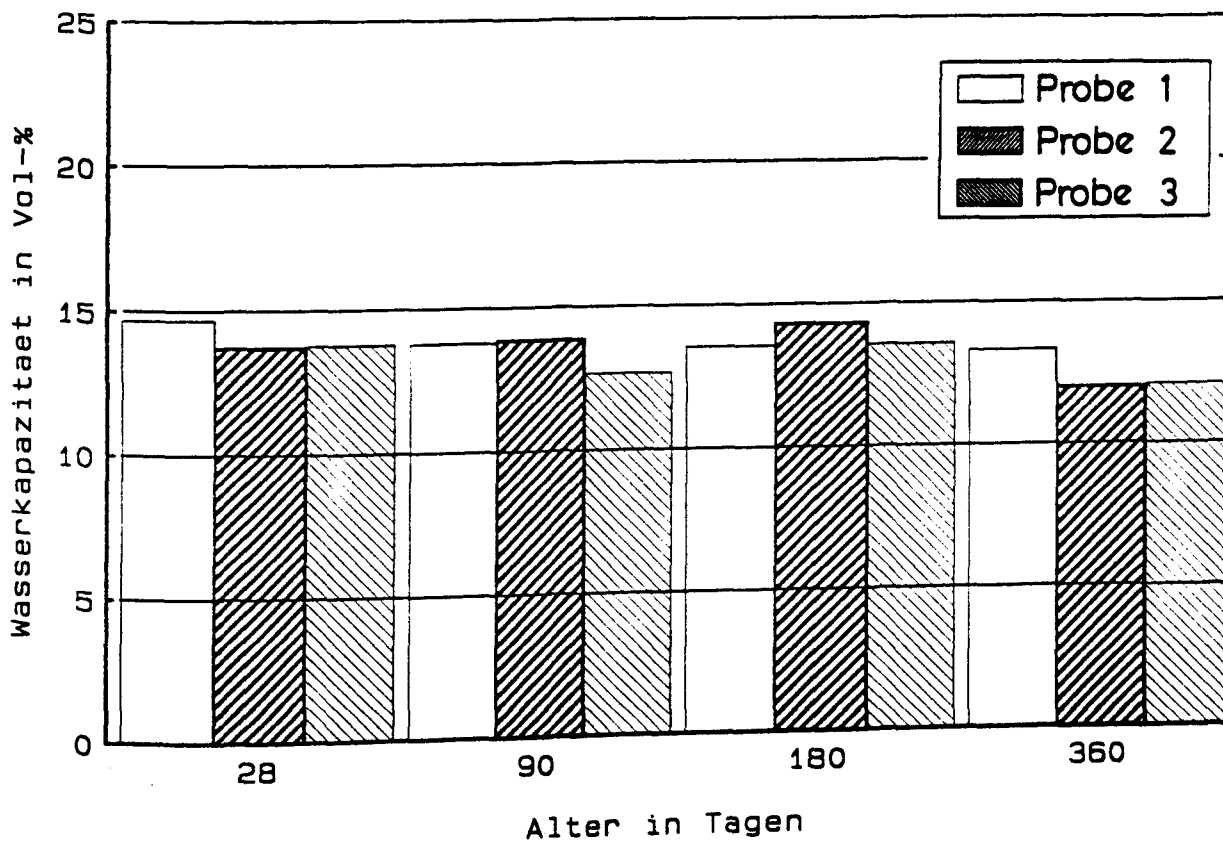


Bild 4.6.70 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand VI. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

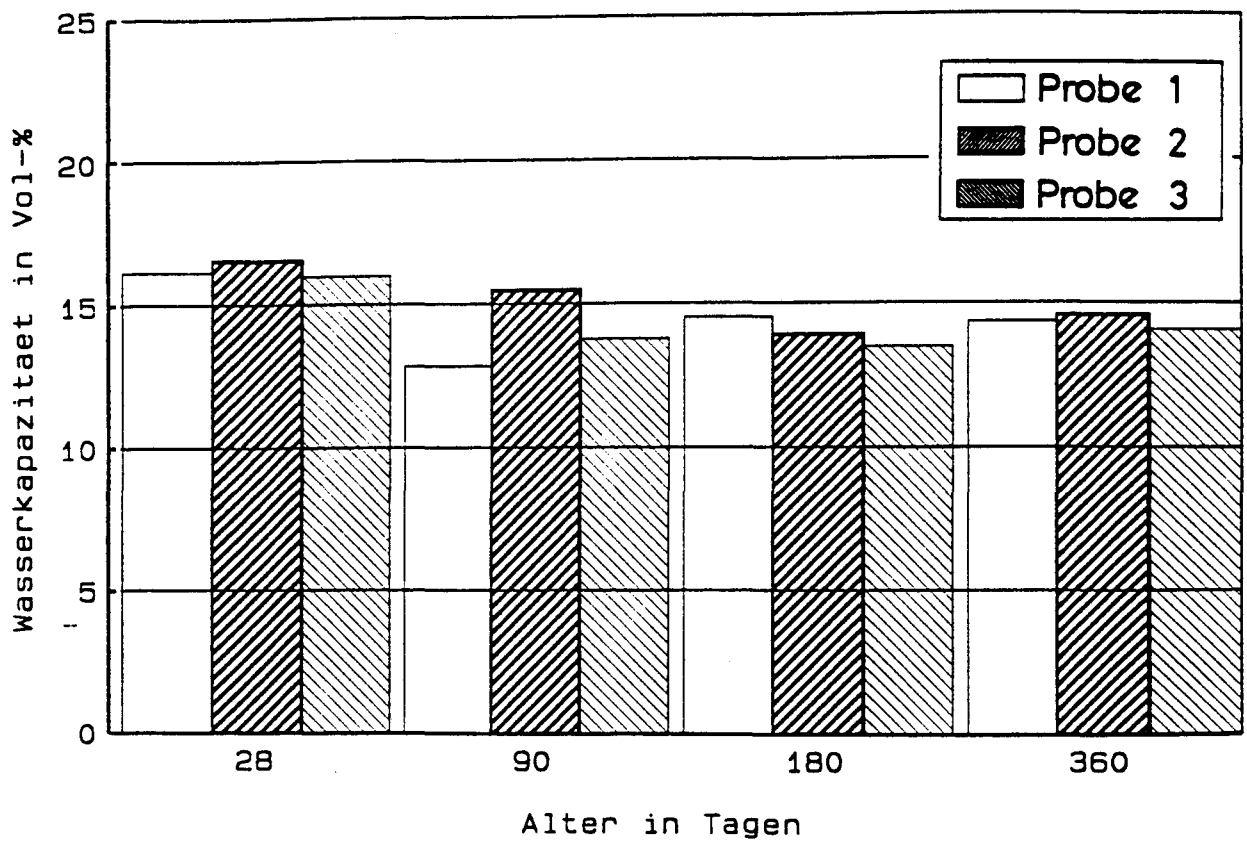


Bild 4.6.71 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand VII. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

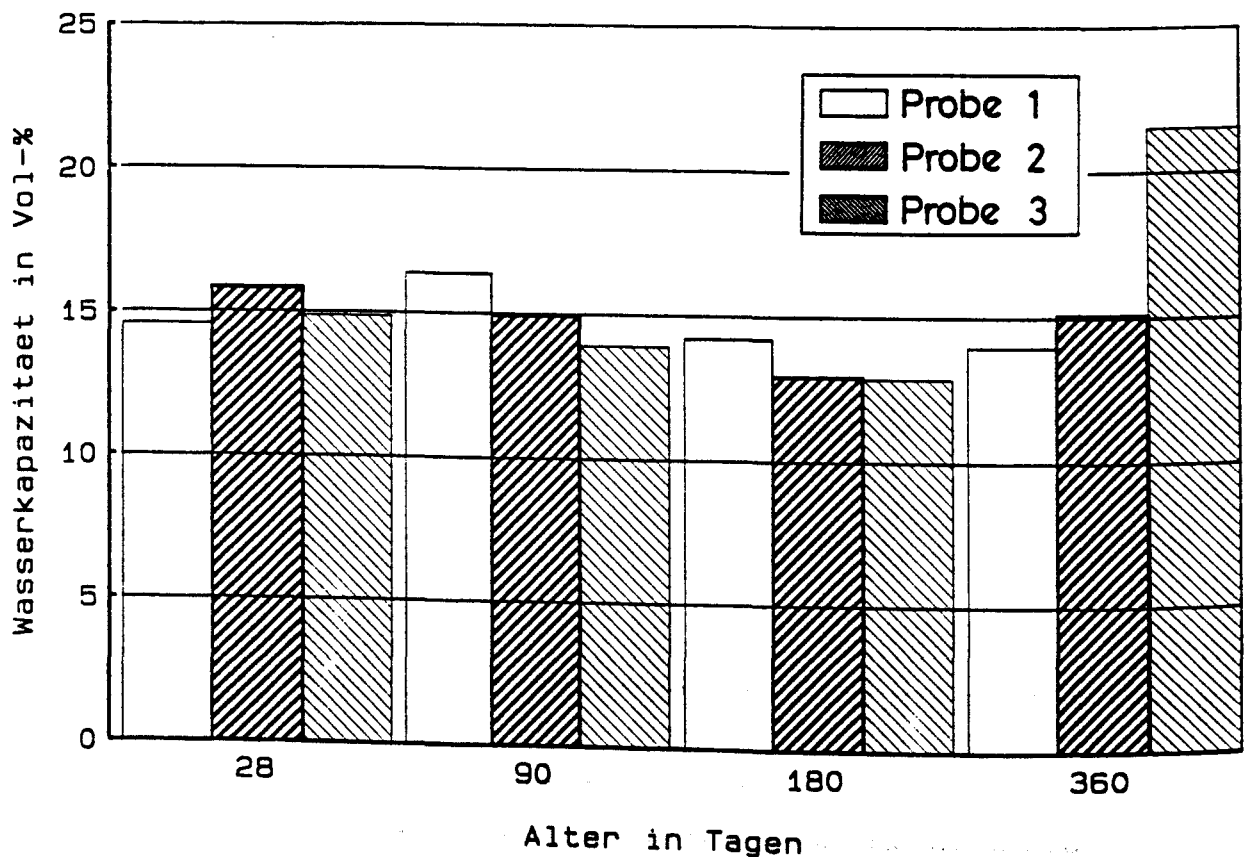


Bild 4.6.72 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand VIII. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

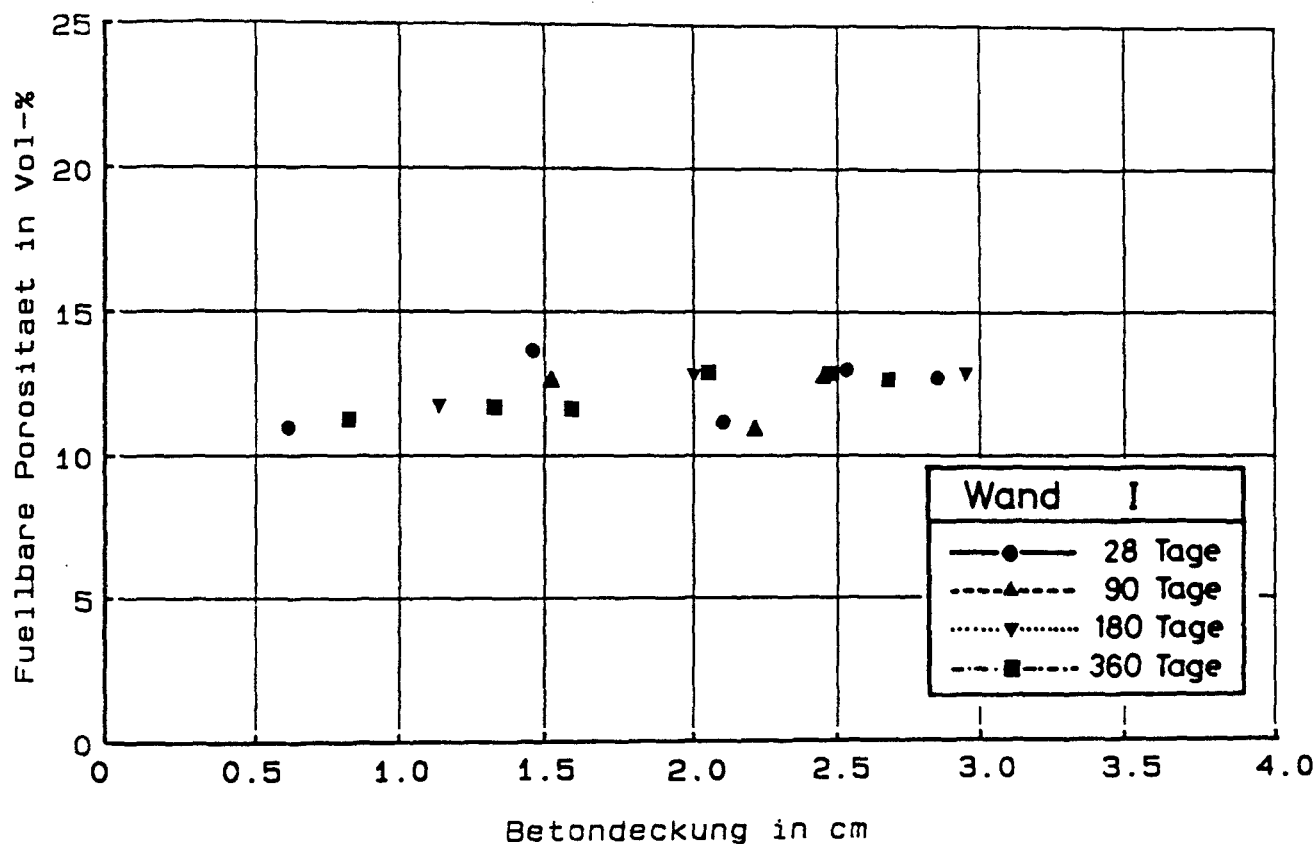


Bild 4.6.73 : Abhängigkeit der füllbaren Porosität von der Dicke der Betondeckung für Wand I.

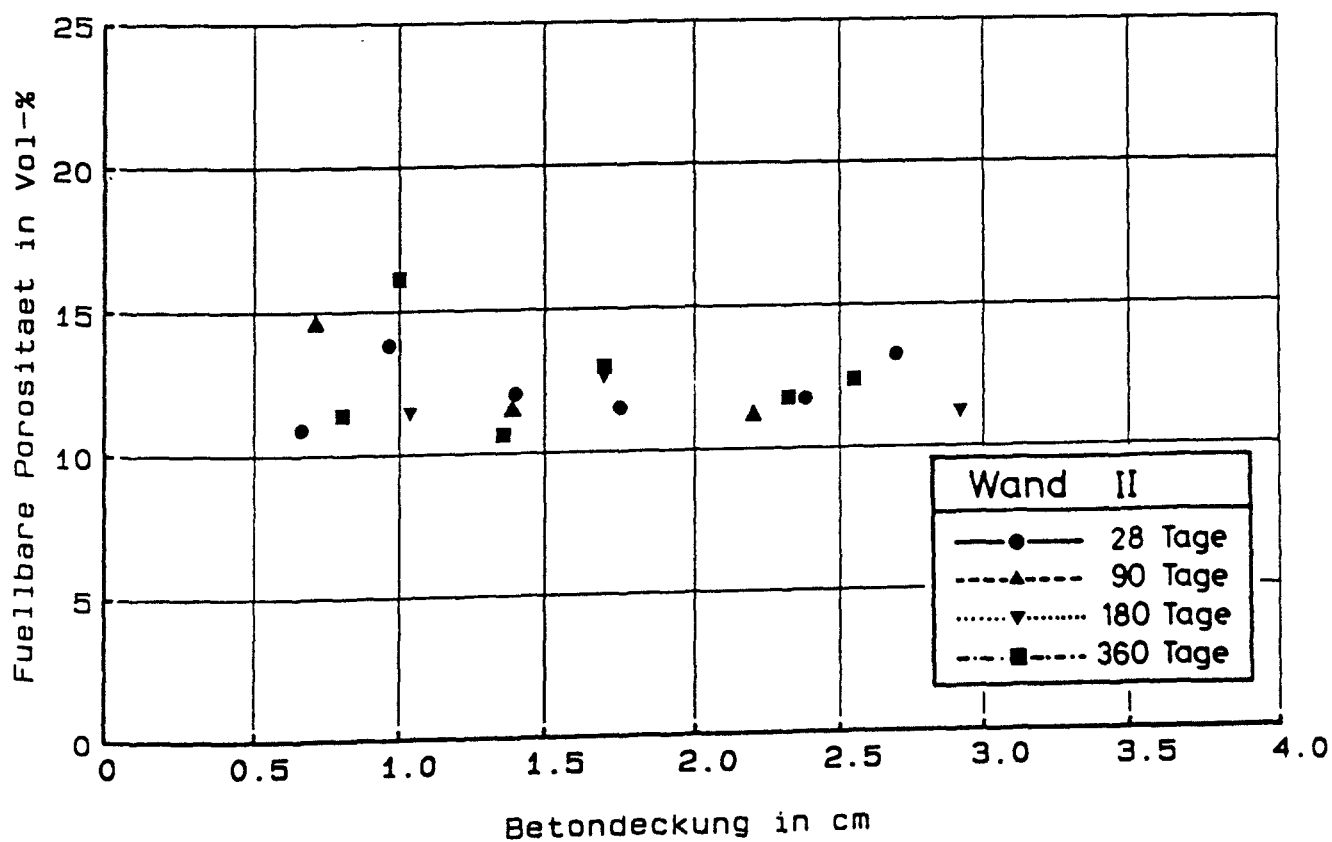


Bild 4.6.74 : Abhängigkeit der füllbaren Porosität von der Dicke der Betondeckung für Wand II.

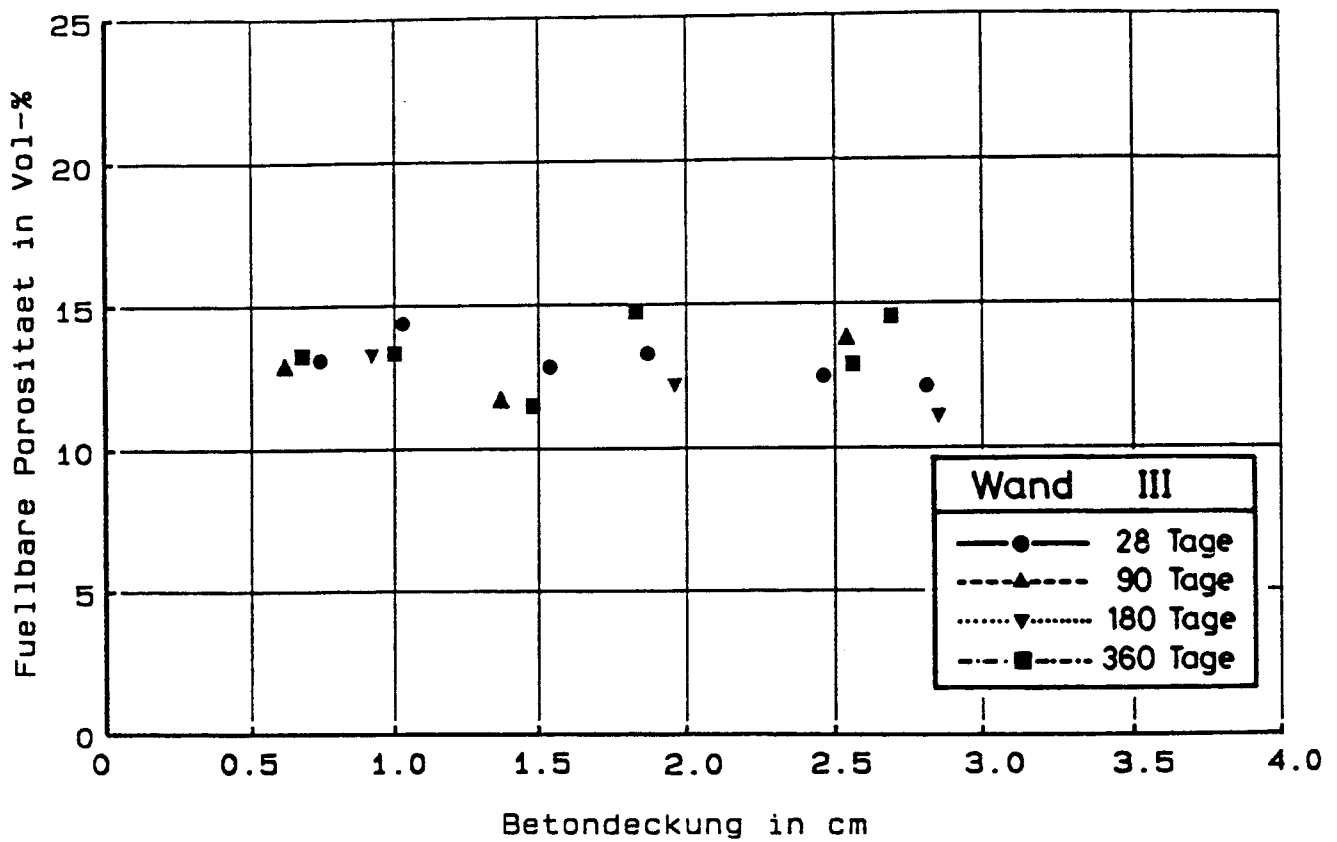


Bild 4.6.75 : Abhängigkeit der füllbaren Porosität von der Dicke der Betondeckung für Wand III.

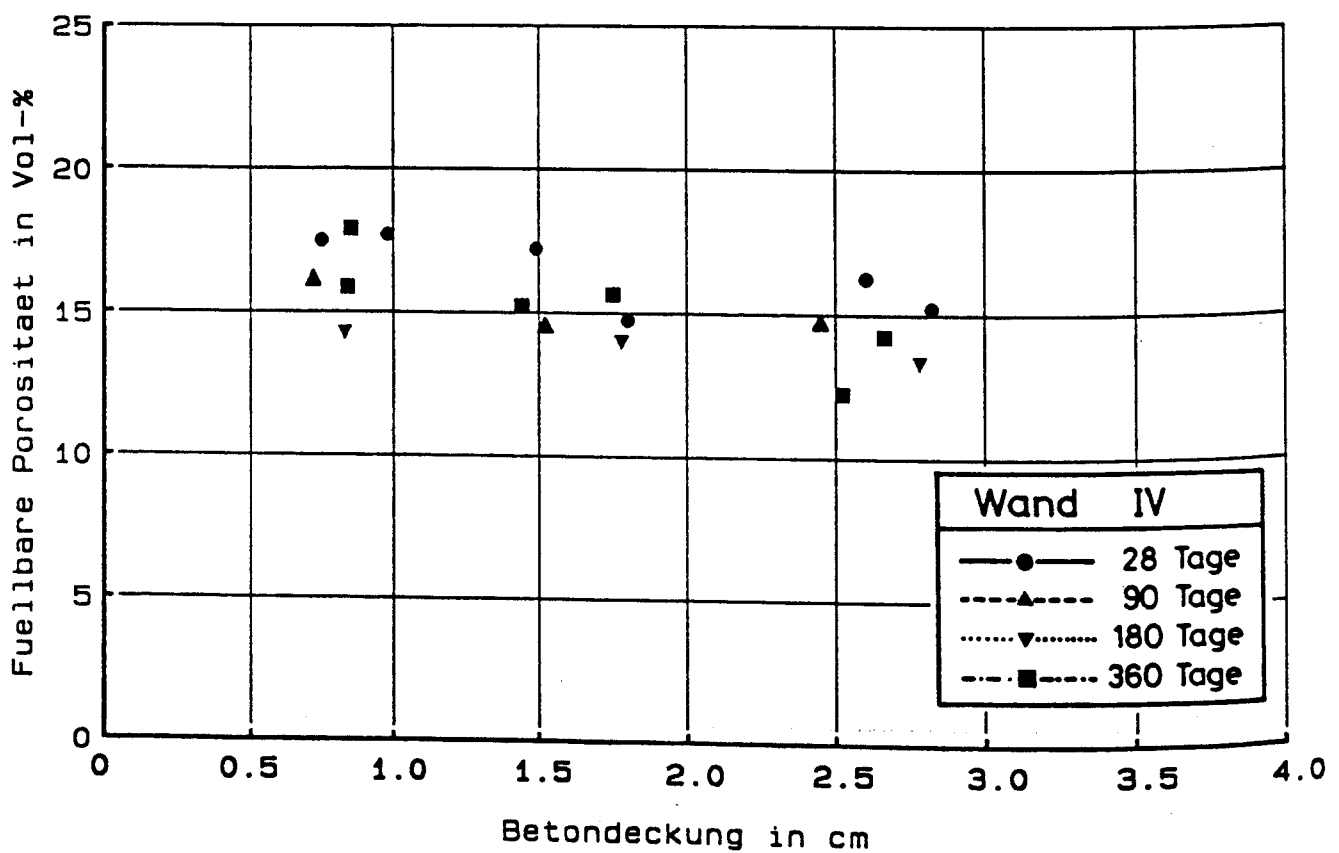


Bild 4.6.76 : Abhängigkeit der füllbaren Porosität von der Dicke der Betondeckung für Wand IV.

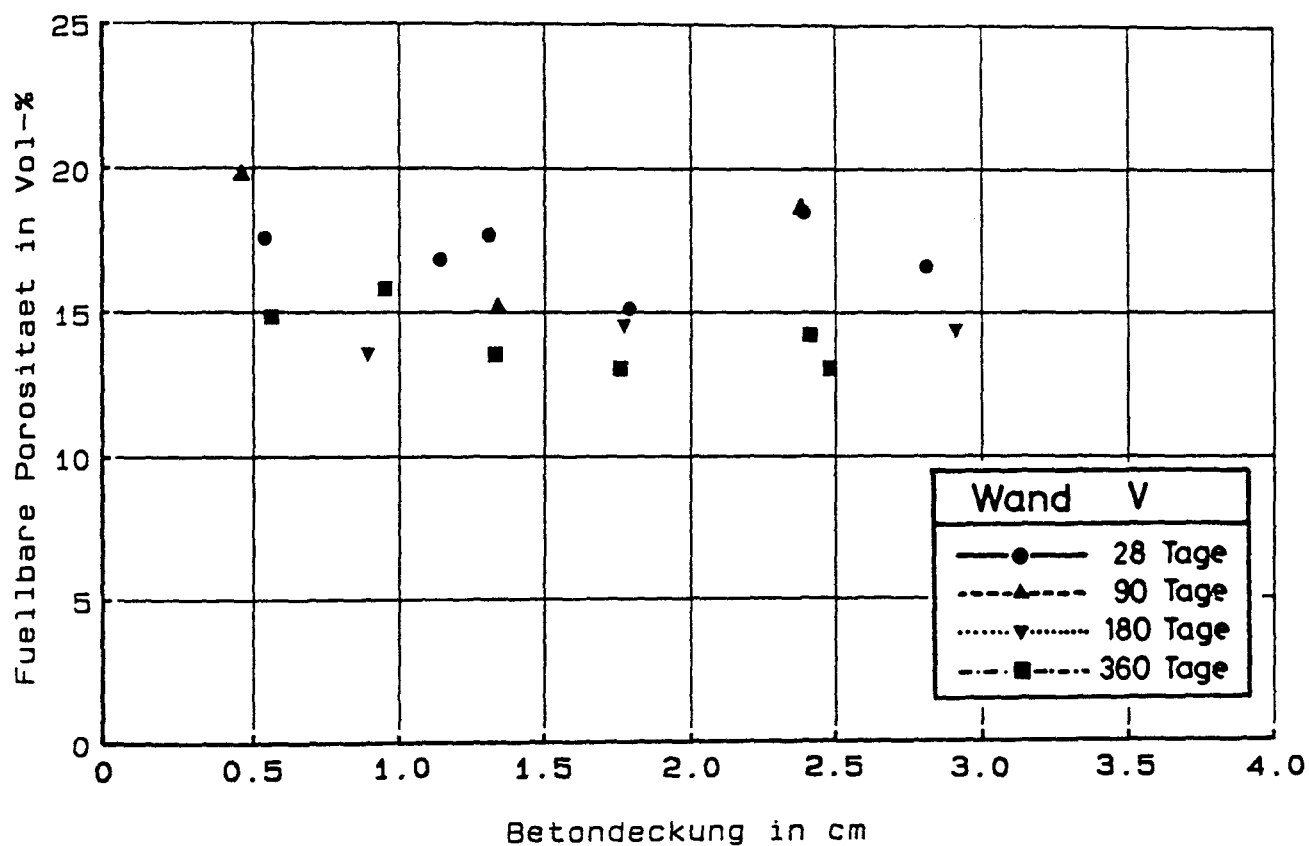


Bild 4.6.77 : Abhängigkeit der füllbaren Porosität von der Dicke der Betondeckung für Wand V.

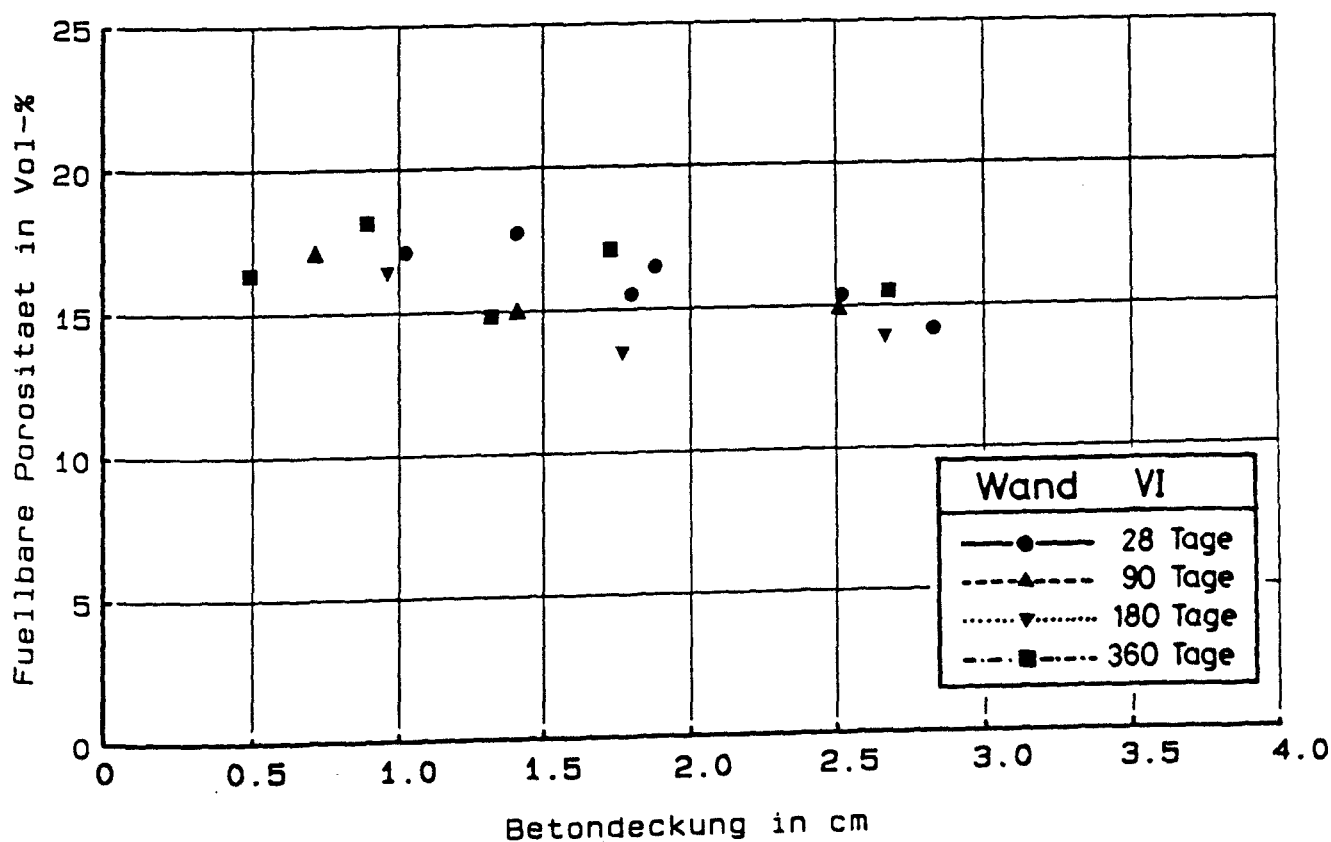


Bild 4.6.78 : Abhängigkeit der füllbaren Porosität von der Dicke der Betondeckung für Wand VI.

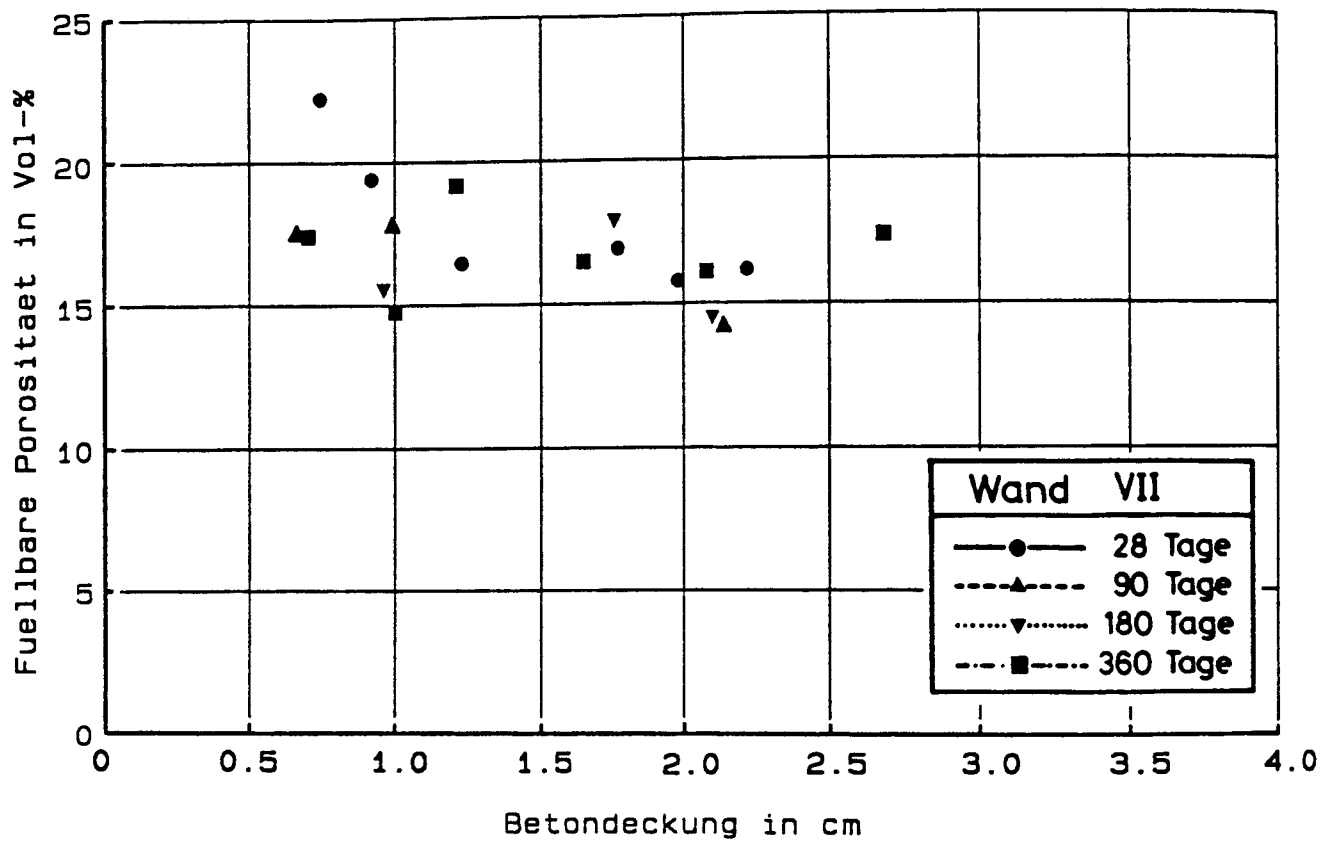


Bild 4.6.79 : Abhängigkeit der füllbaren Porosität von der Dicke der Betondeckung für Wand VII.

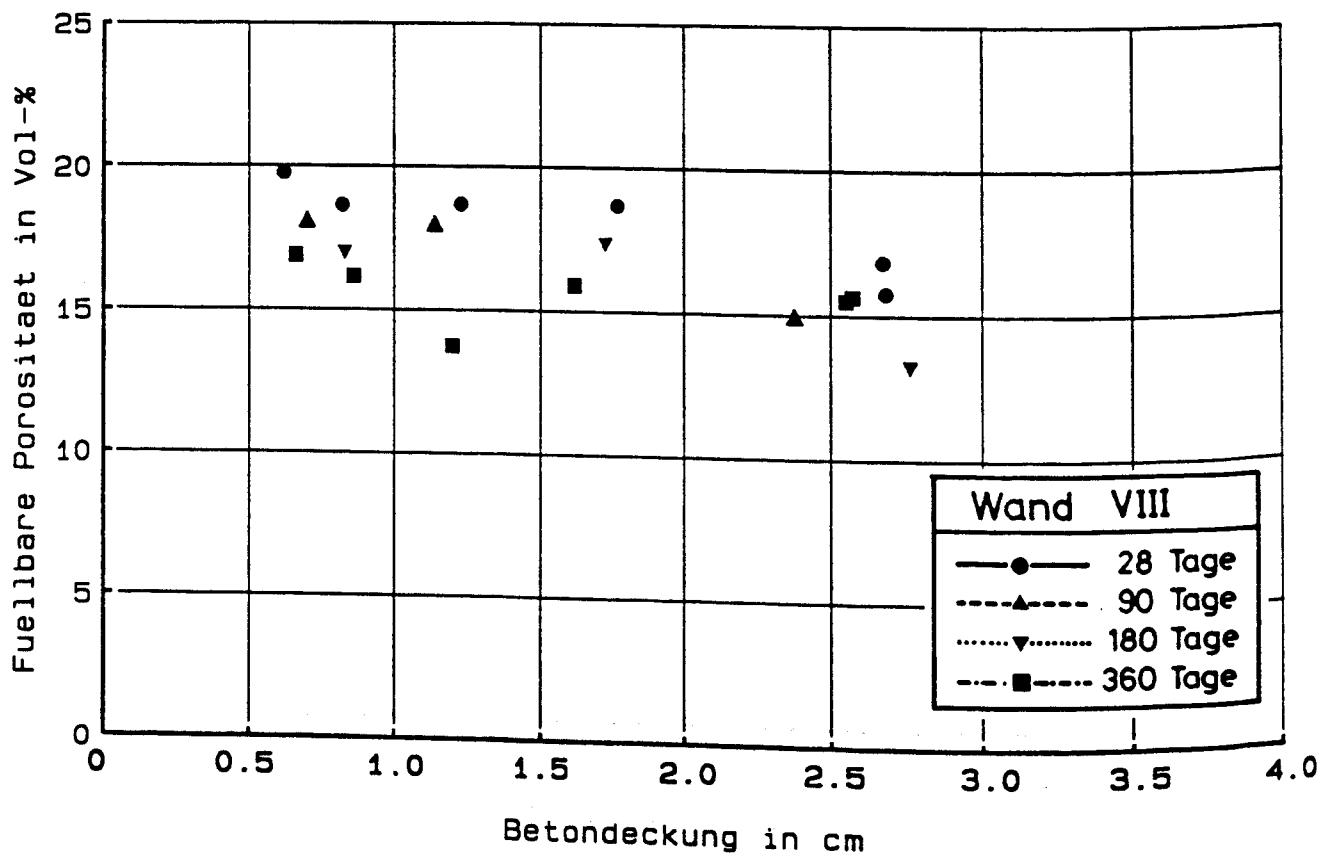


Bild 4.6.80 : Abhängigkeit der füllbaren Porosität von der Dicke der Betondeckung für Wand VIII.

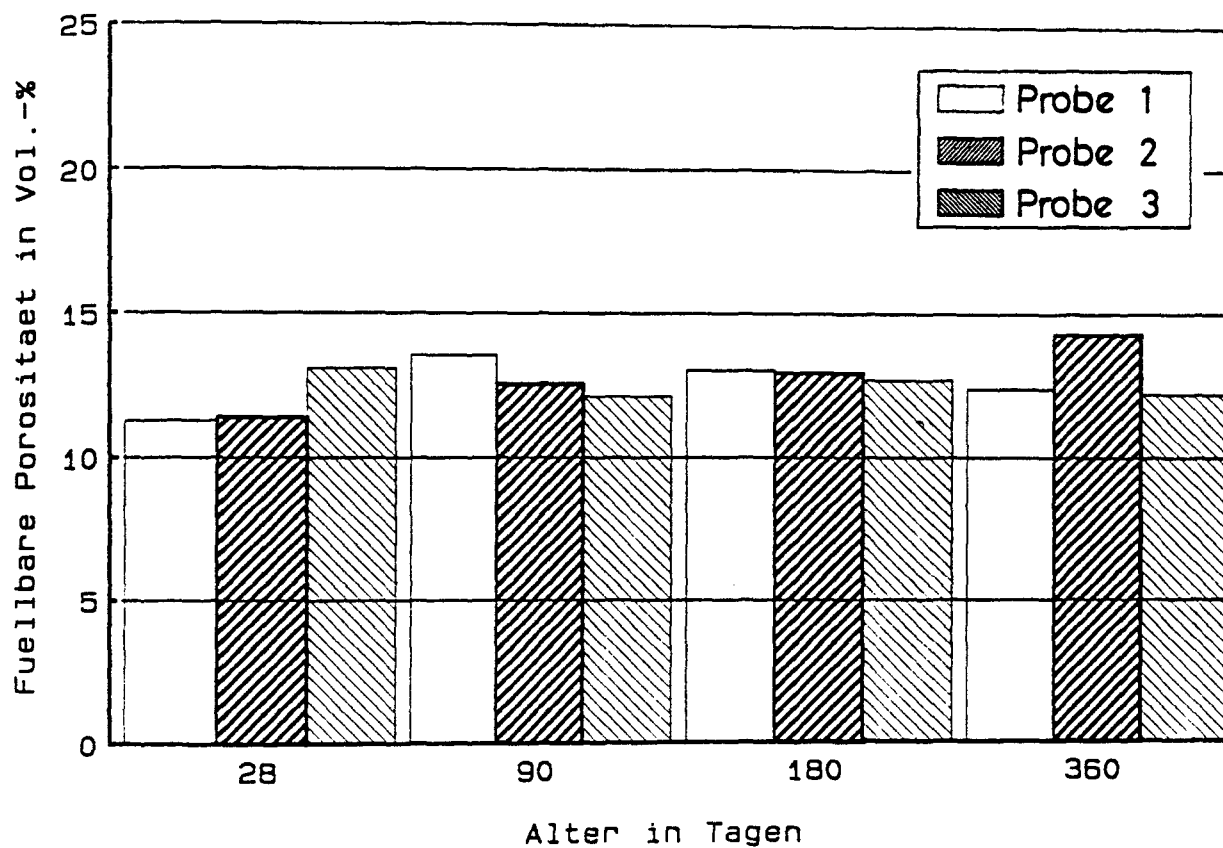


Bild 4.6.81 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand I. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

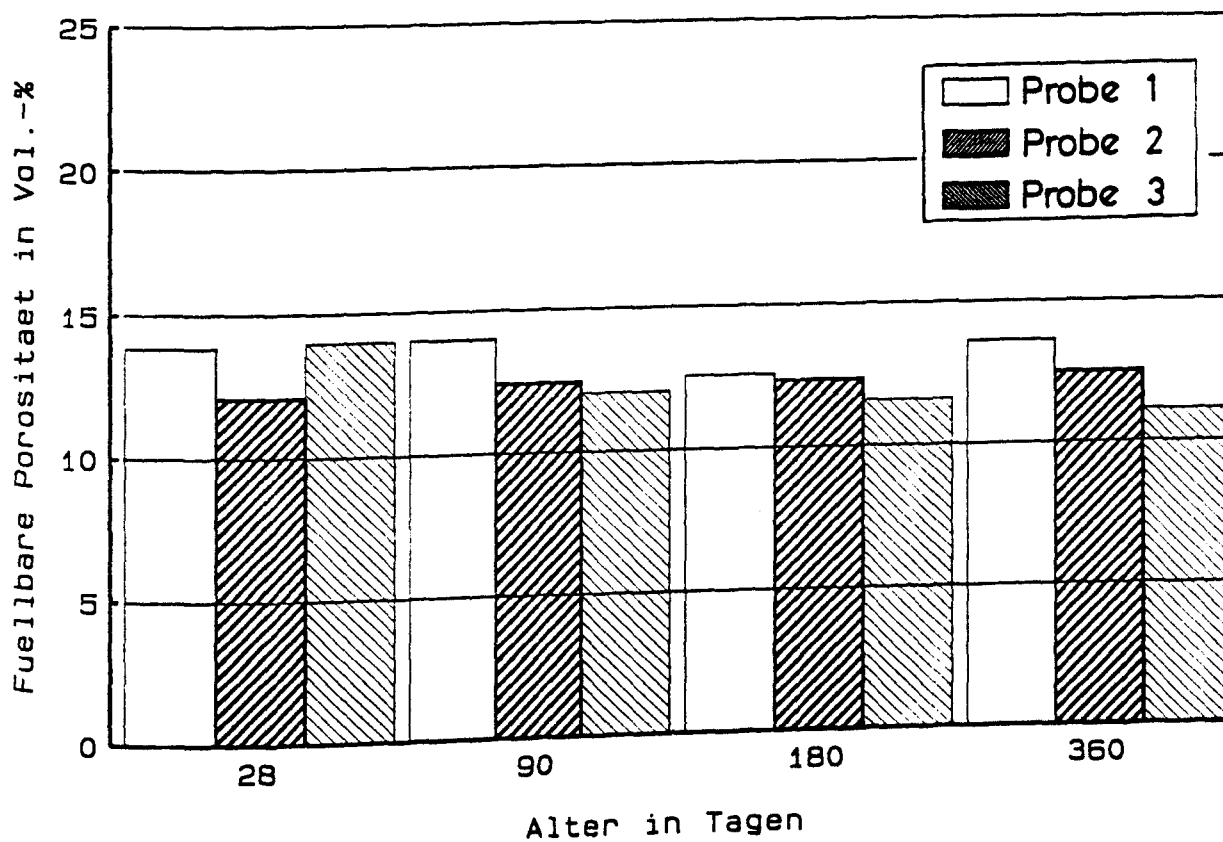


Bild 4.6.82 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand II. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

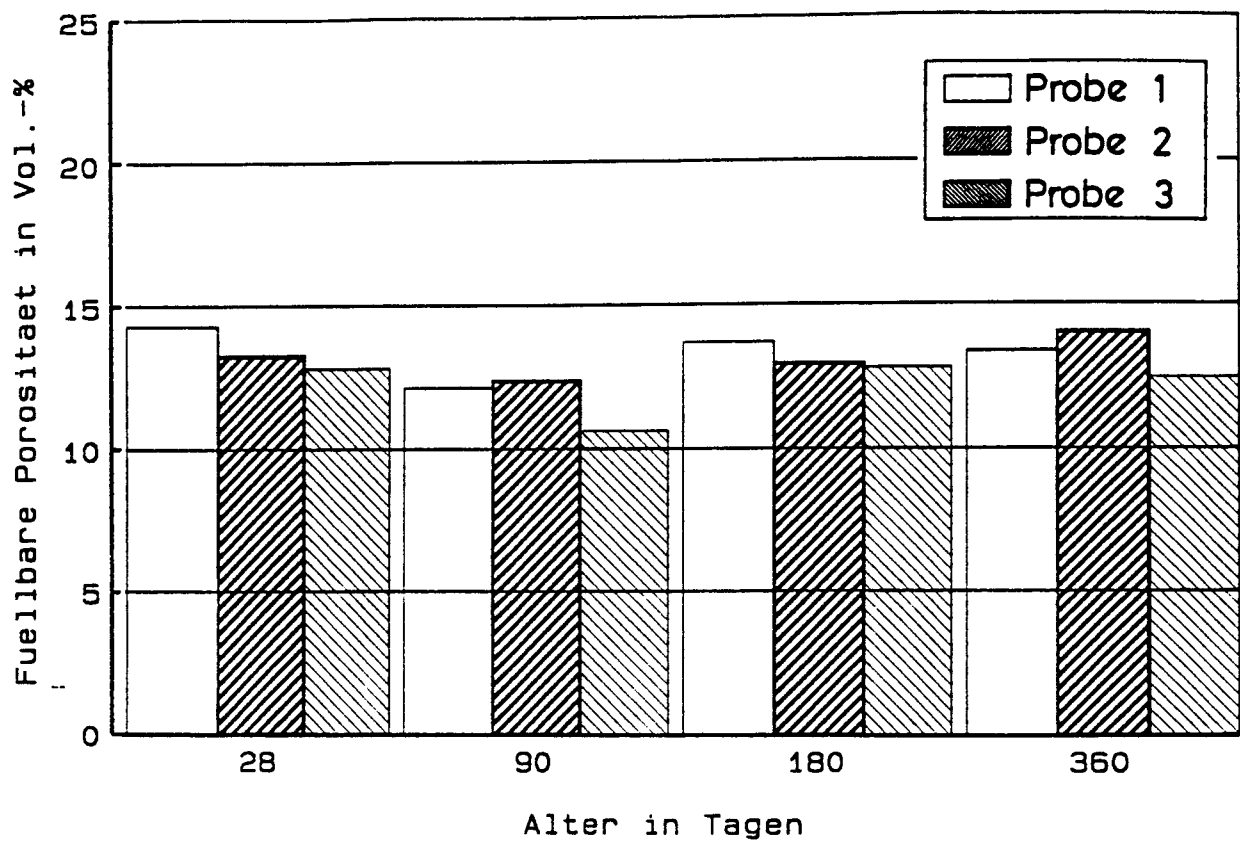


Bild 4.6.83 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand III. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

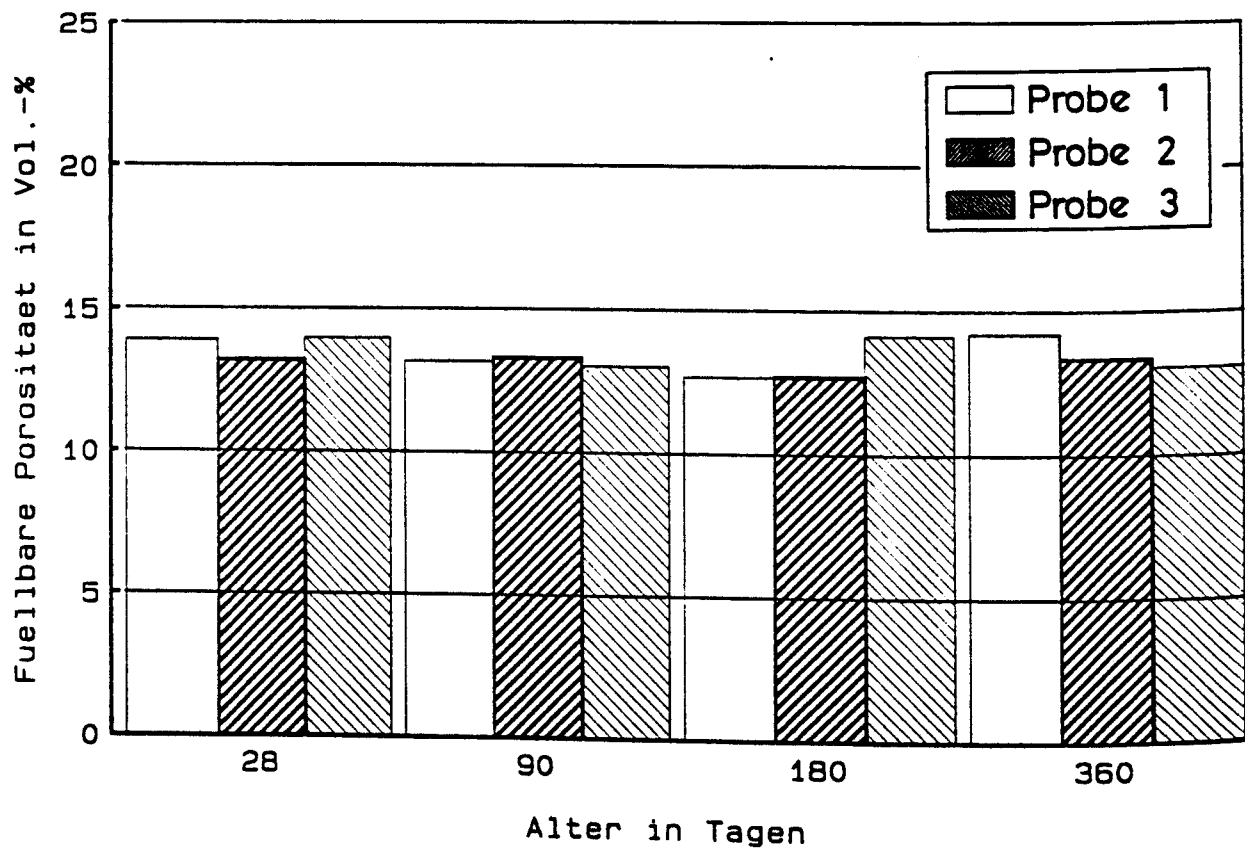


Bild 4.6.84 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand IV. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

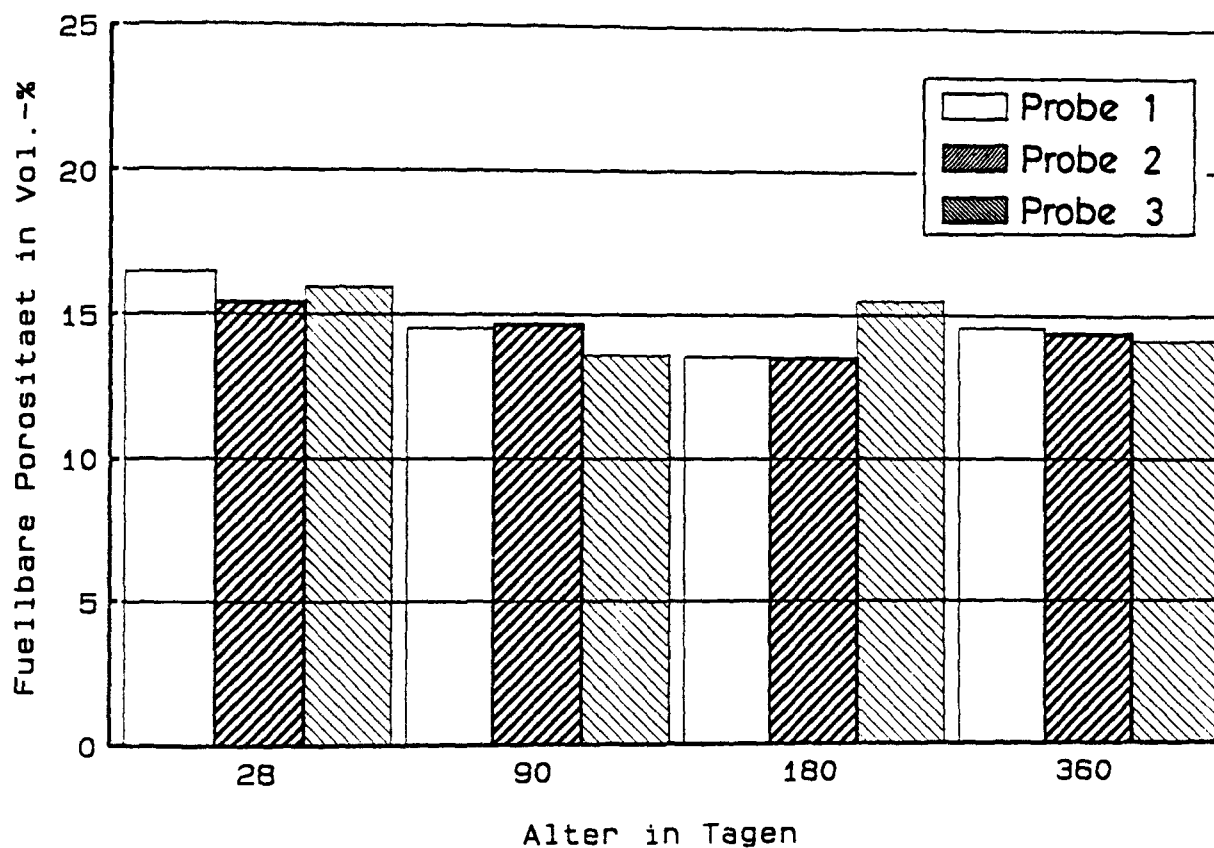


Bild 4.6.85 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand V. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

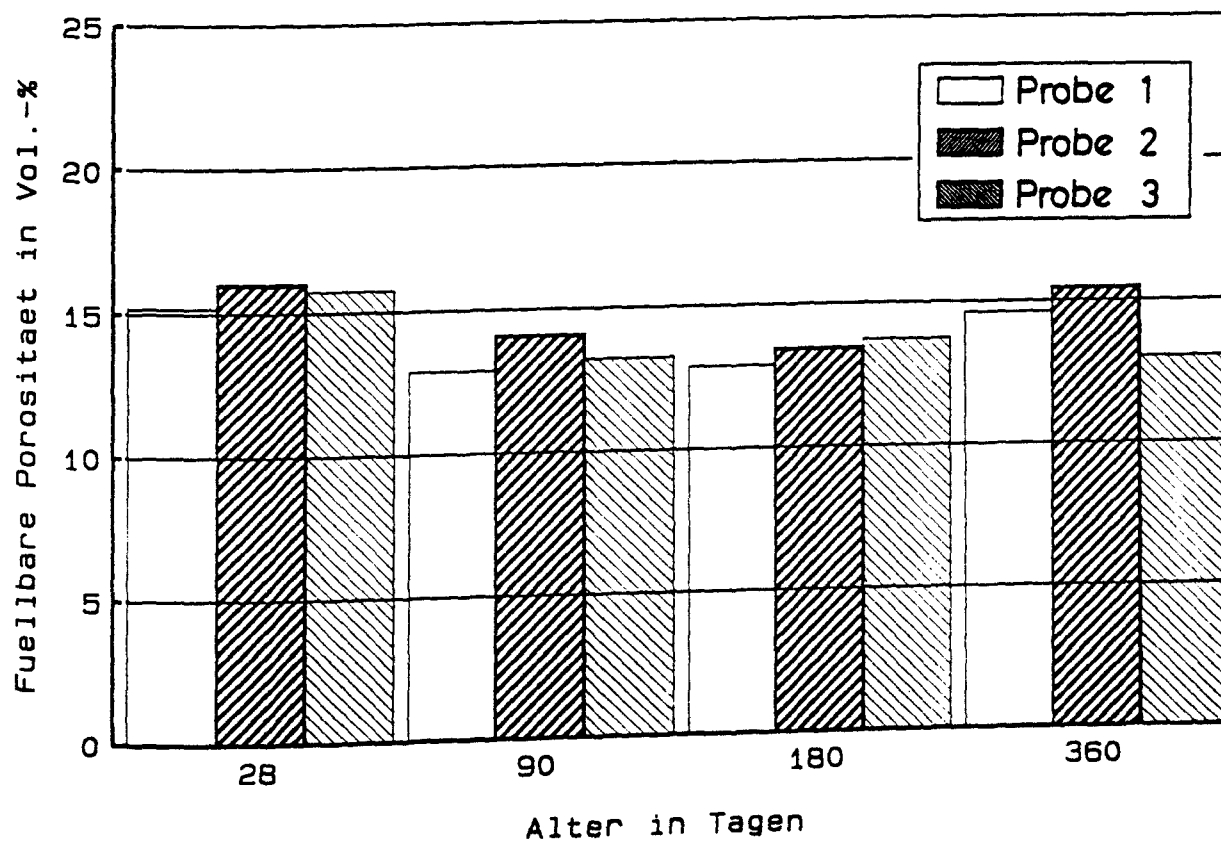


Bild 4.6.86 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand VI. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

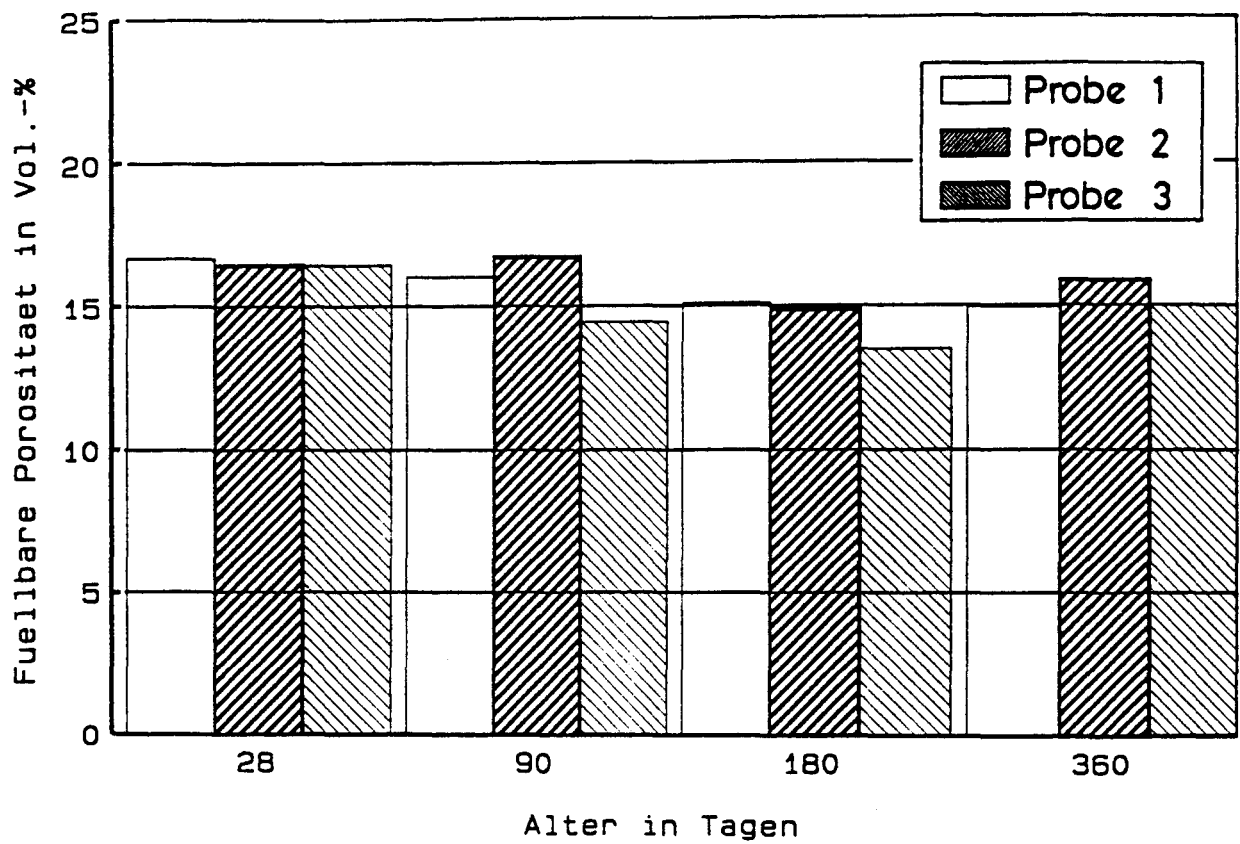


Bild 4.6.87 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand VII. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

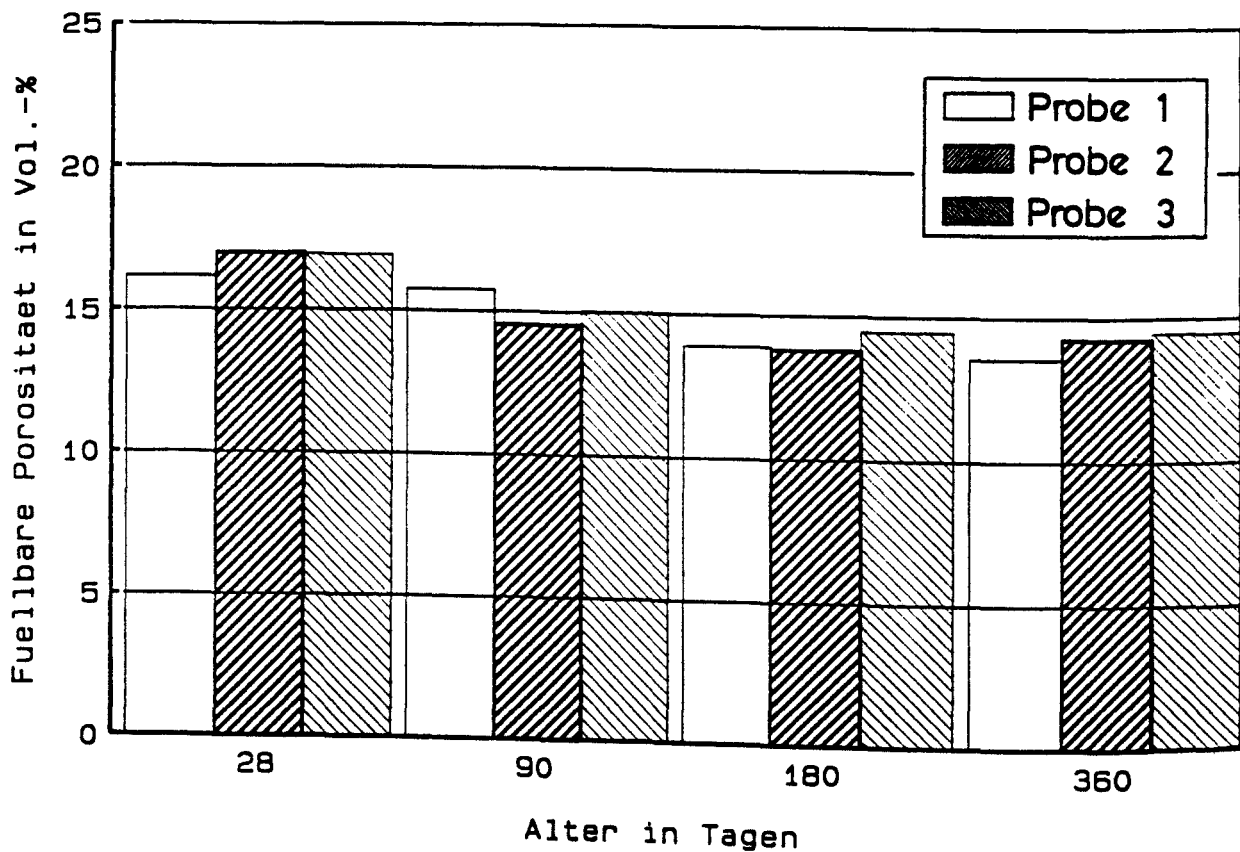


Bild 4.6.88 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand VIII. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

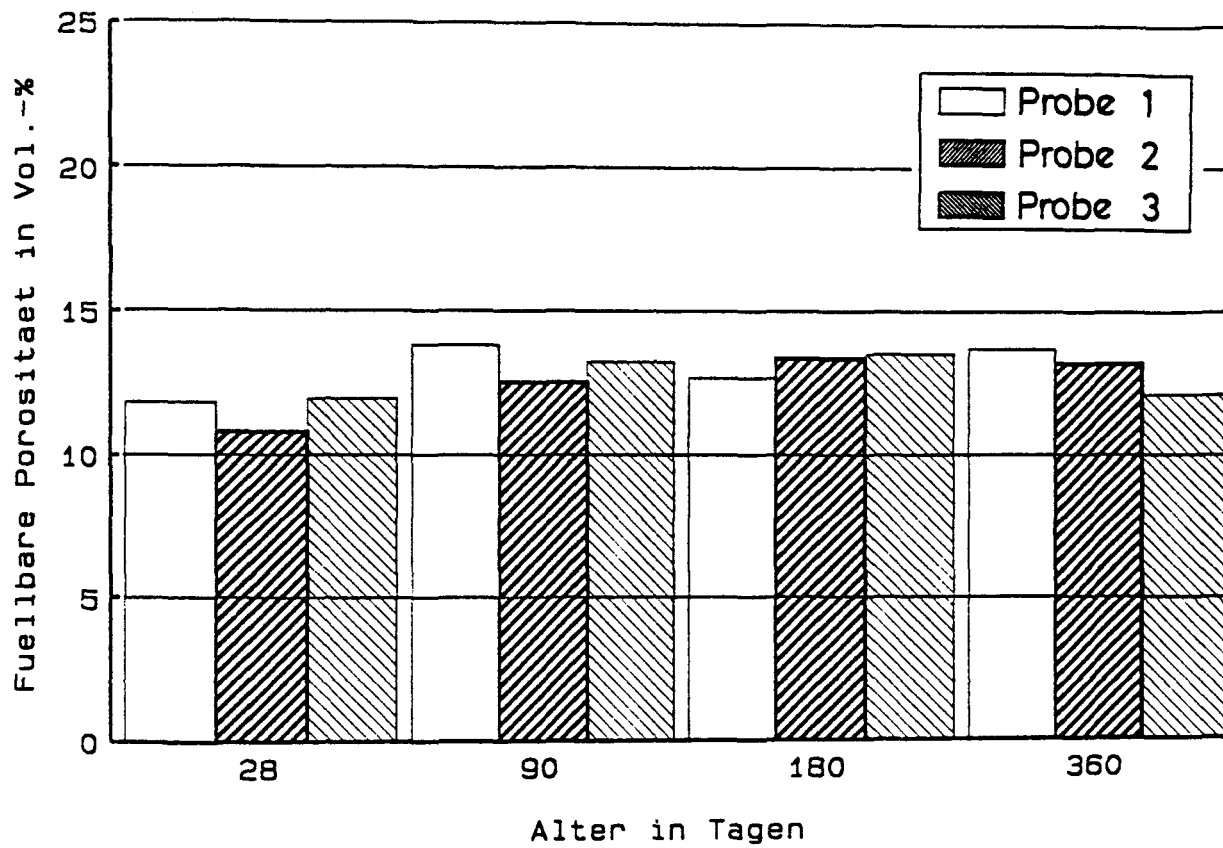


Bild 4.6.89 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand I. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

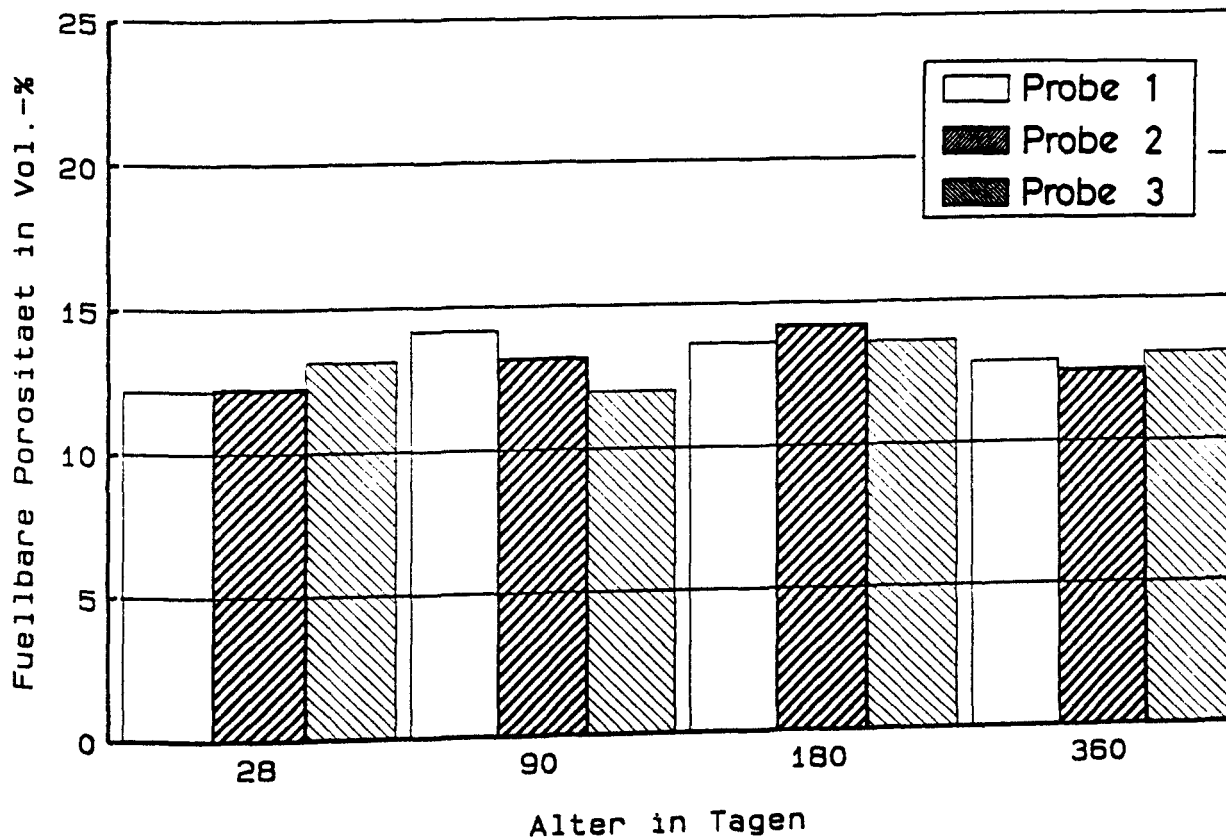


Bild 4.6.90 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand II. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

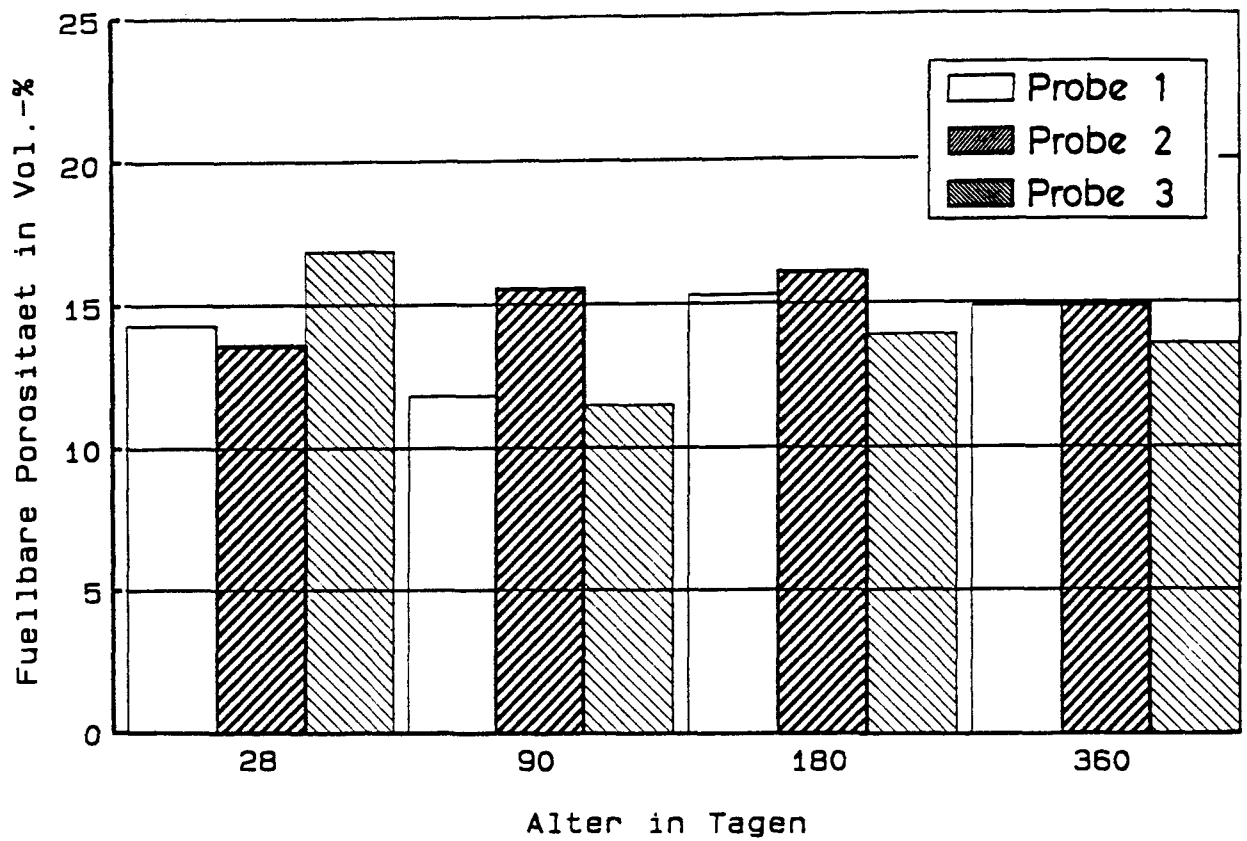


Bild 4.6.91 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand III. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

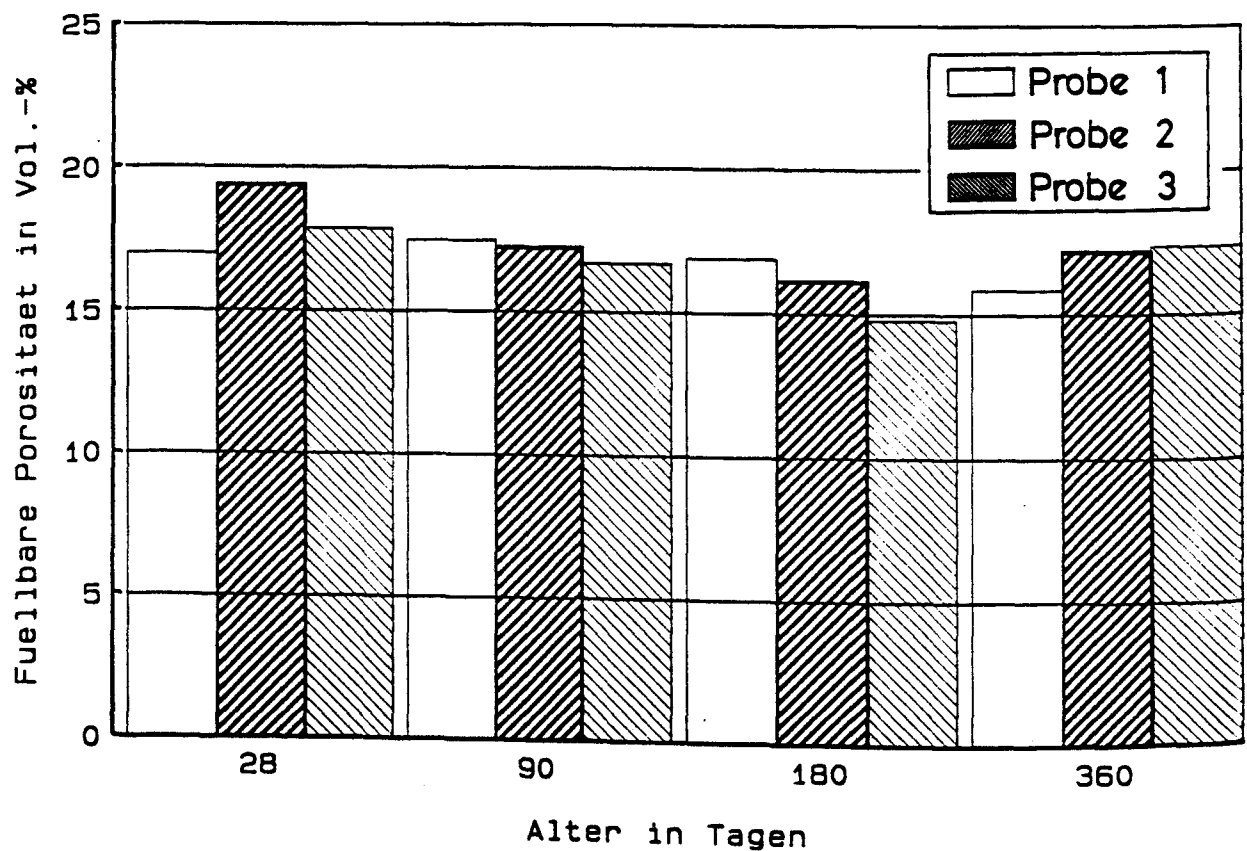


Bild 4.6.92 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand IV. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

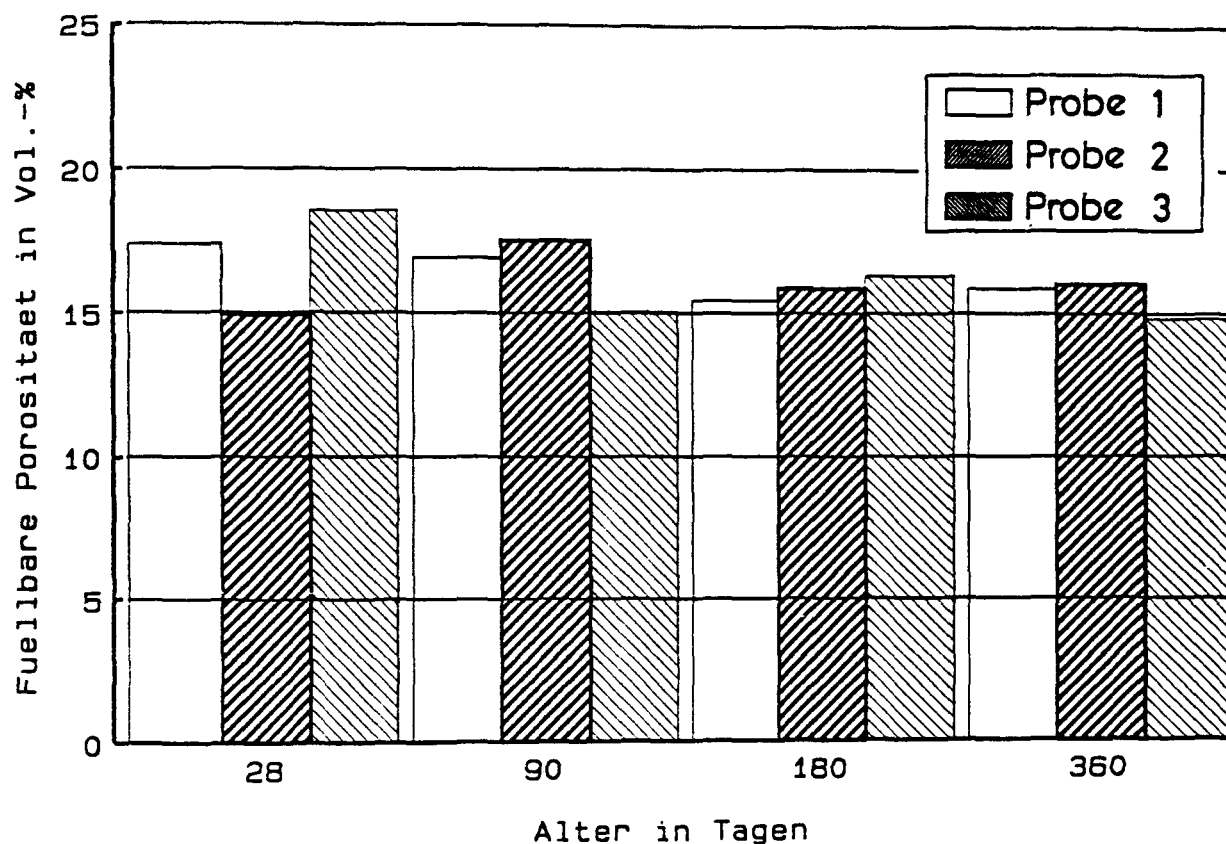


Bild 4.6.93 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand V. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

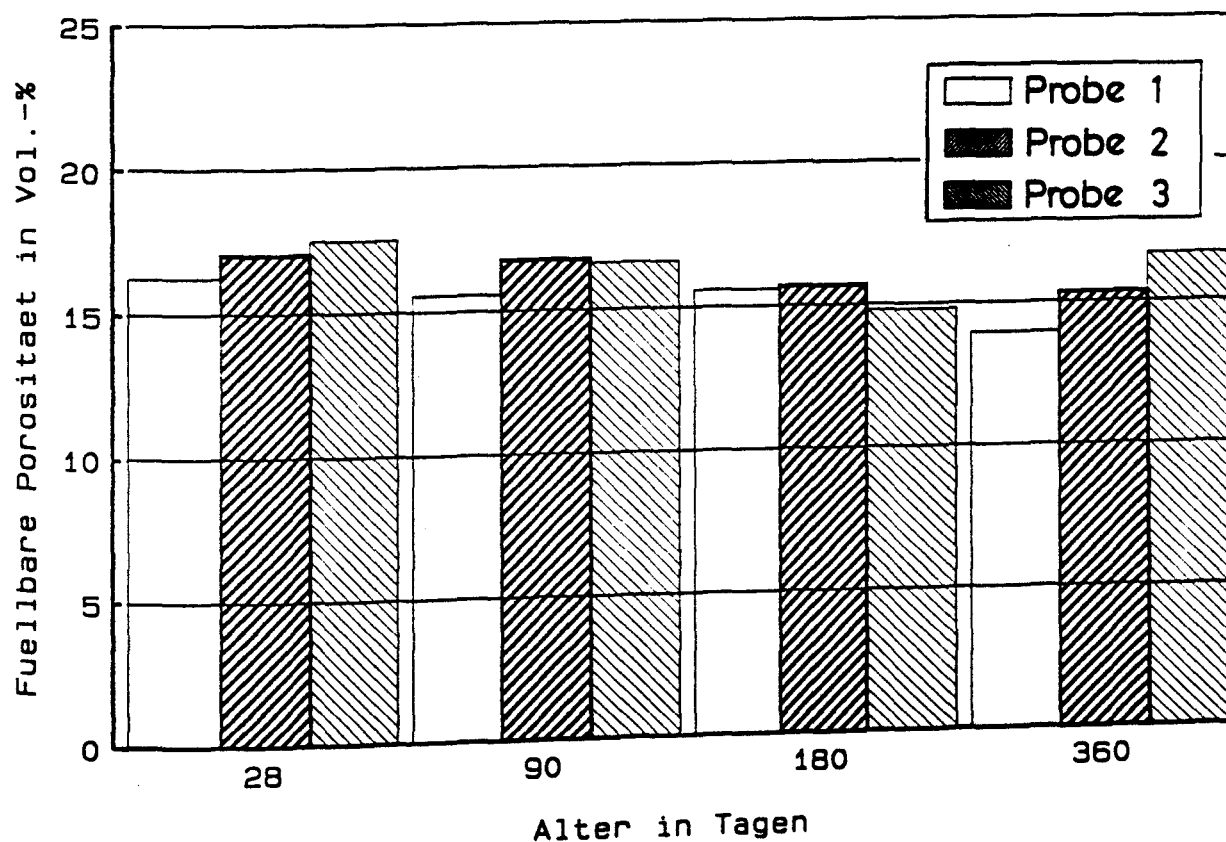


Bild 4.6.94 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand VI. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

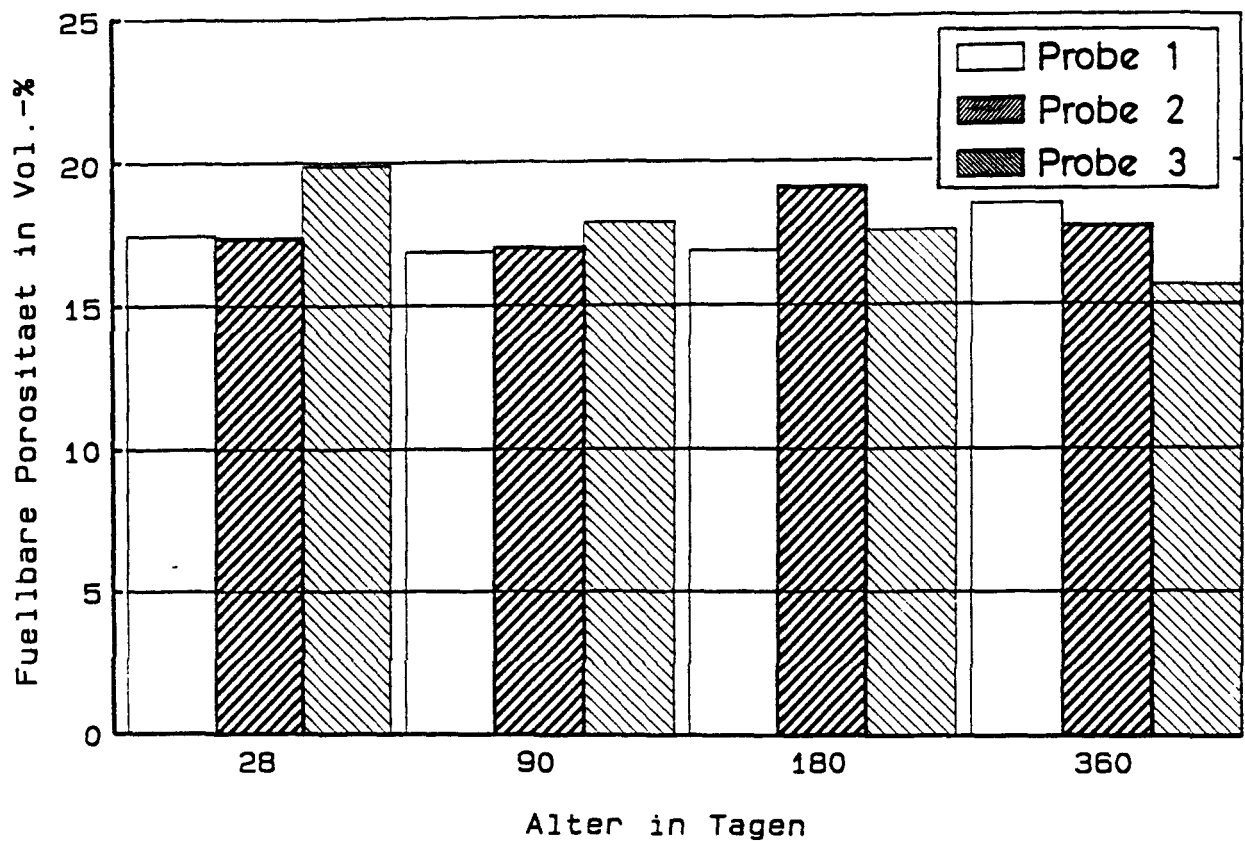


Bild 4.6.95 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand VII. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

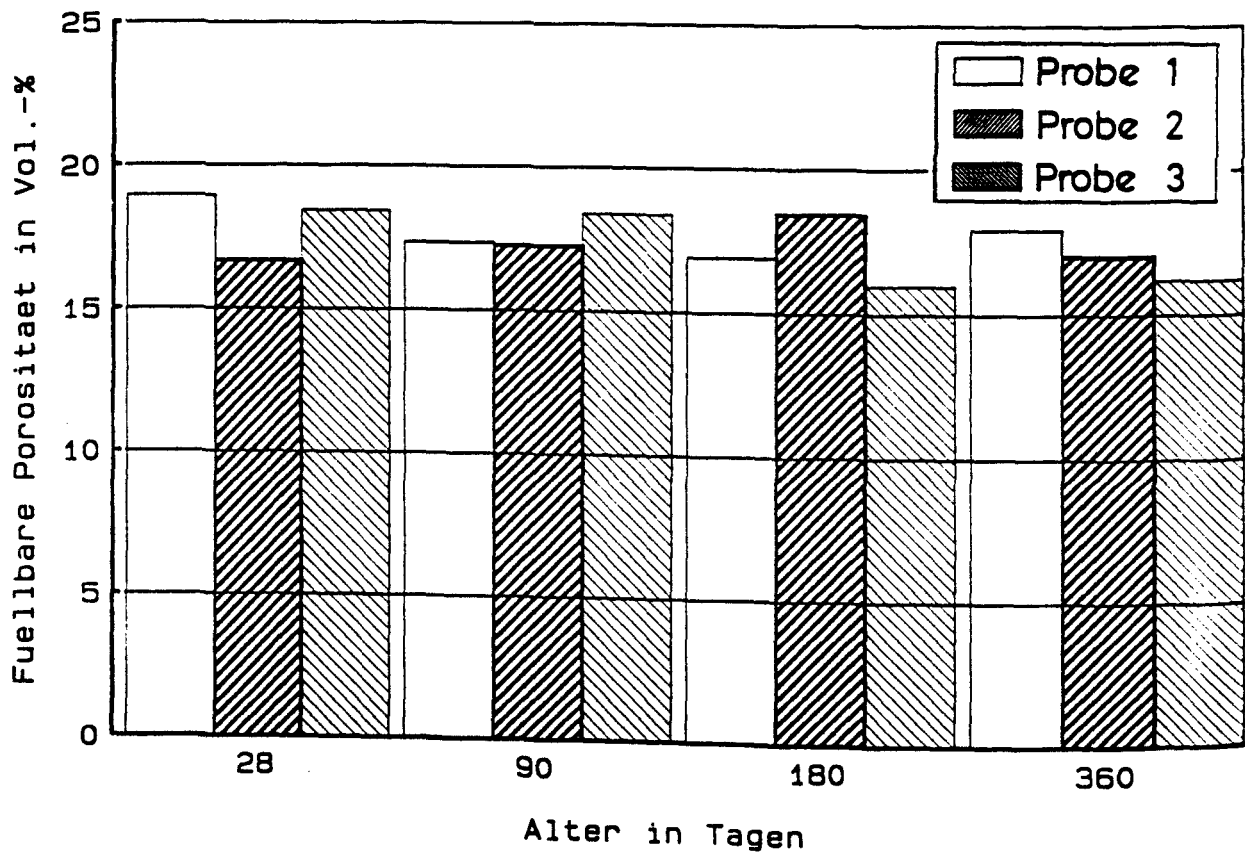


Bild 4.6.96 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand VIII. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

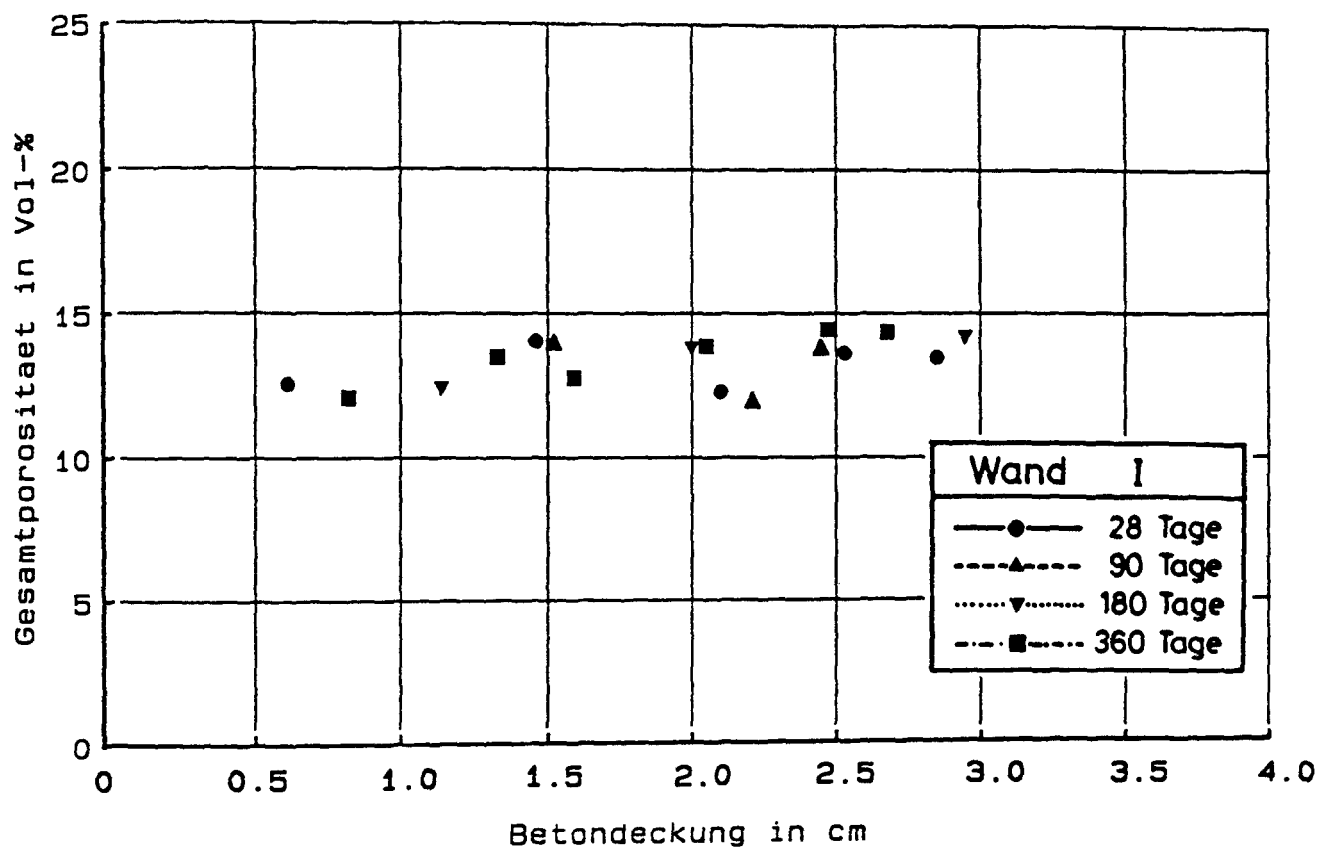


Bild 4.6.97 : Abhängigkeit der Gesamtporosität von der Dicke der Betondeckung für Wand I.

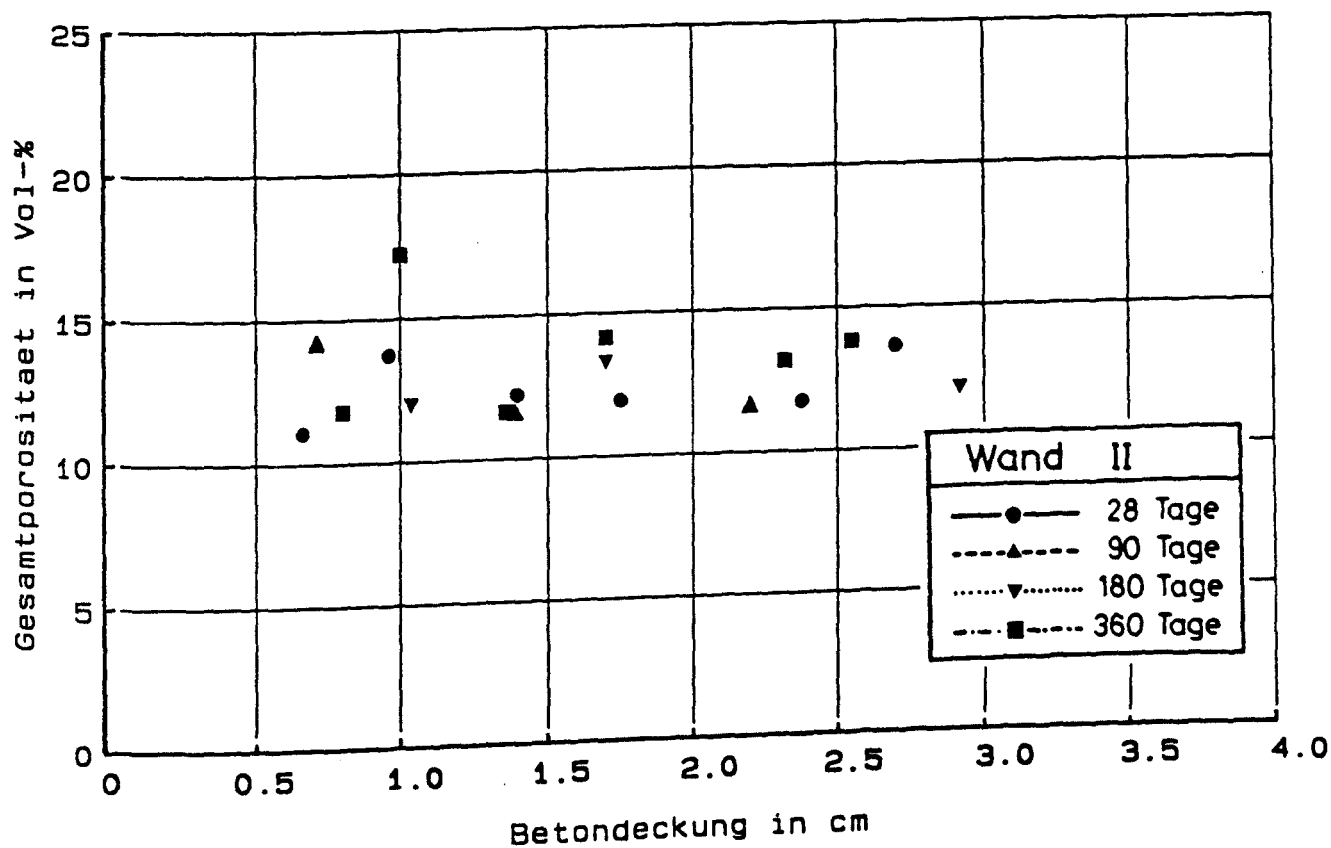


Bild 4.6.98 : Abhängigkeit der Gesamtporosität von der Dicke der Betondeckung für Wand II.

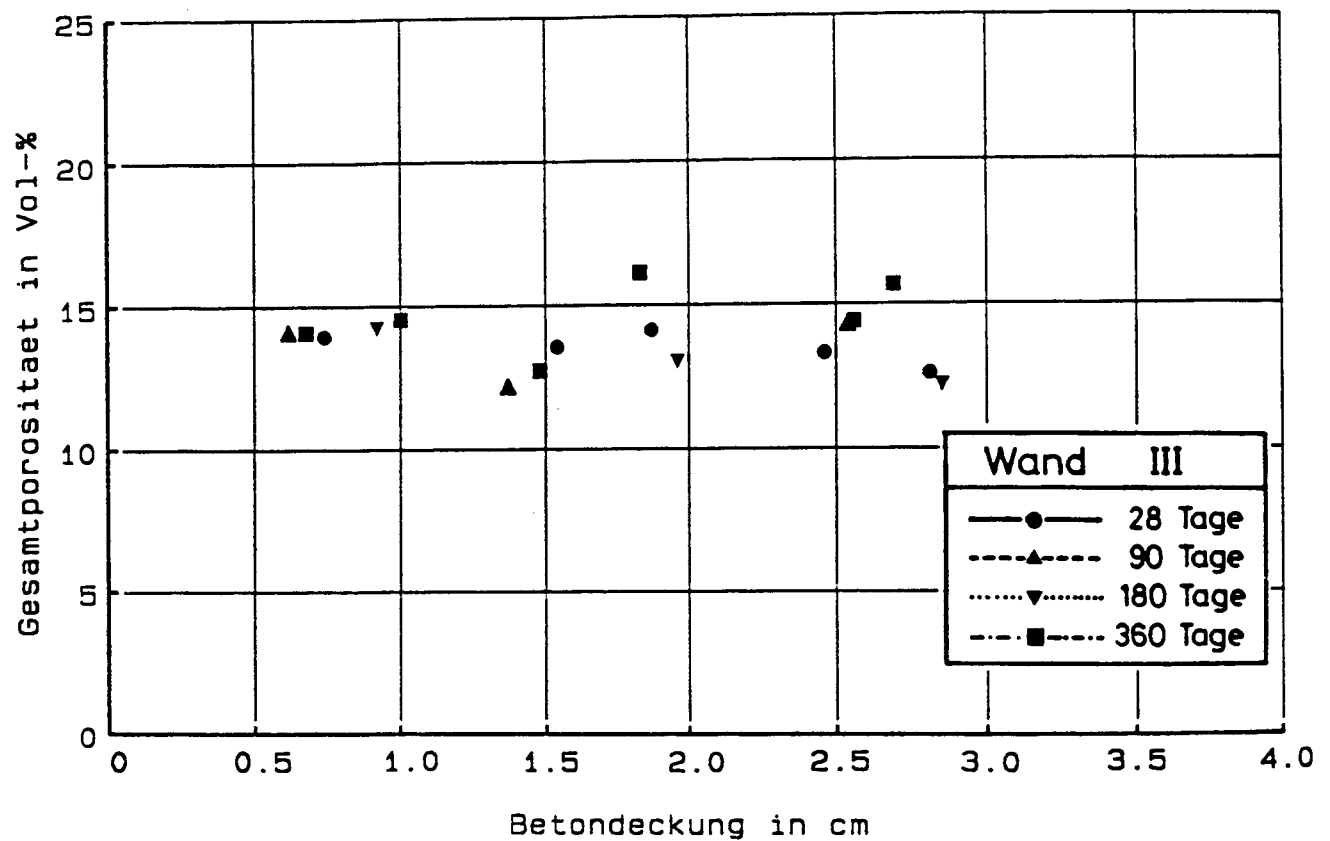


Bild 4.6.99 : Abhängigkeit der Gesamtporosität von der Dicke der Betondeckung für Wand III.

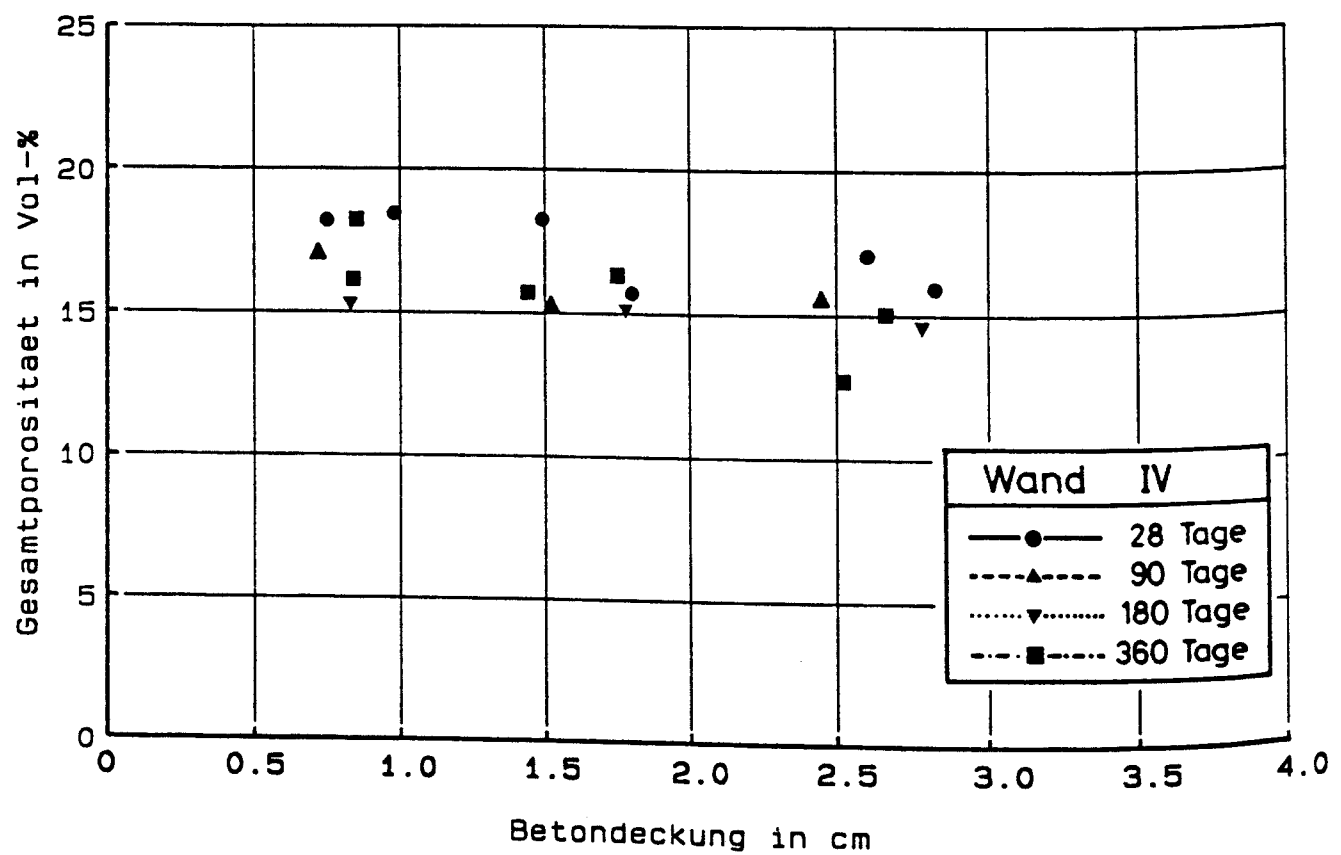


Bild 4.6.100 : Abhängigkeit der Gesamtporosität von der Dicke der Betondeckung für Wand IV.

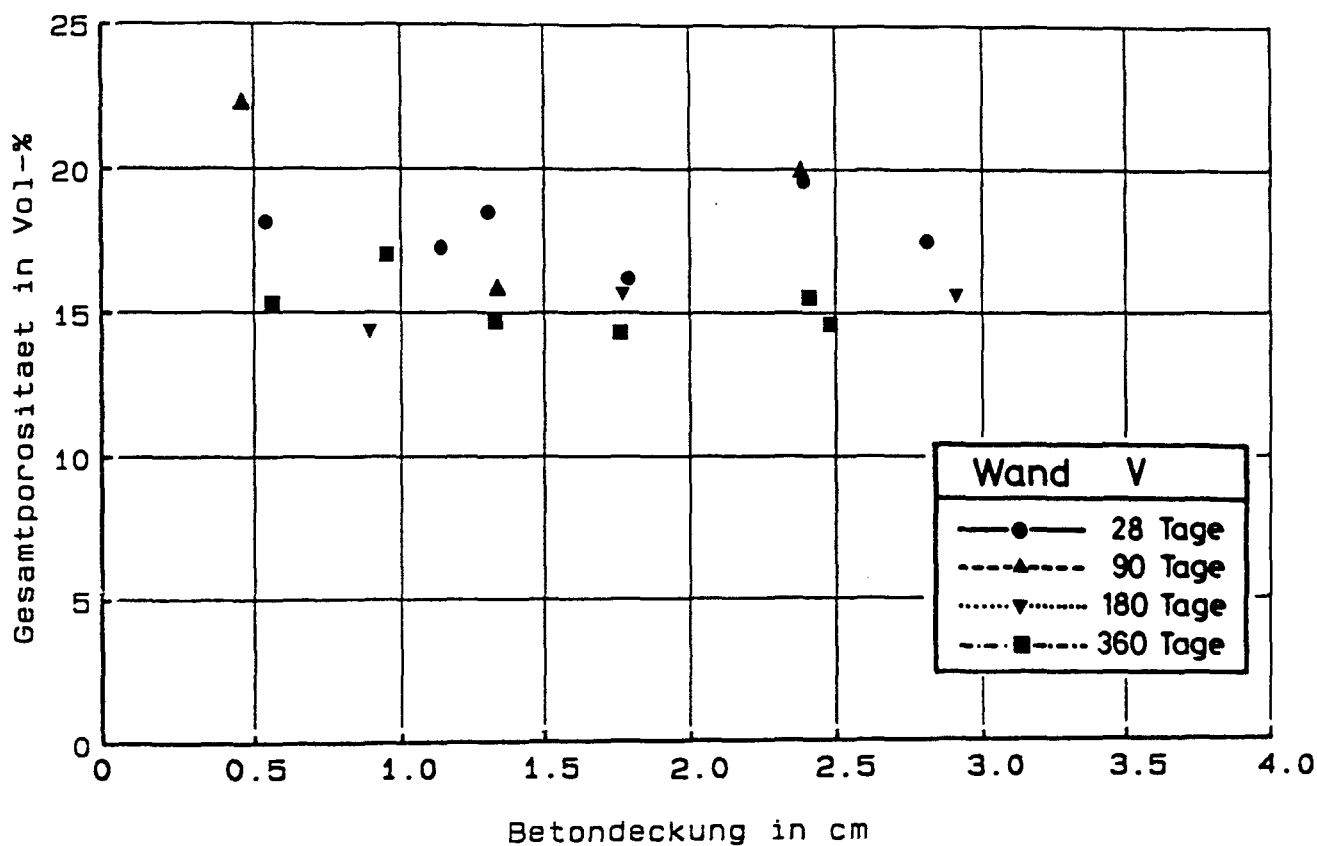


Bild 4.6.101 : Abhängigkeit der Gesamtporosität von der Dicke der Betondeckung für Wand V.

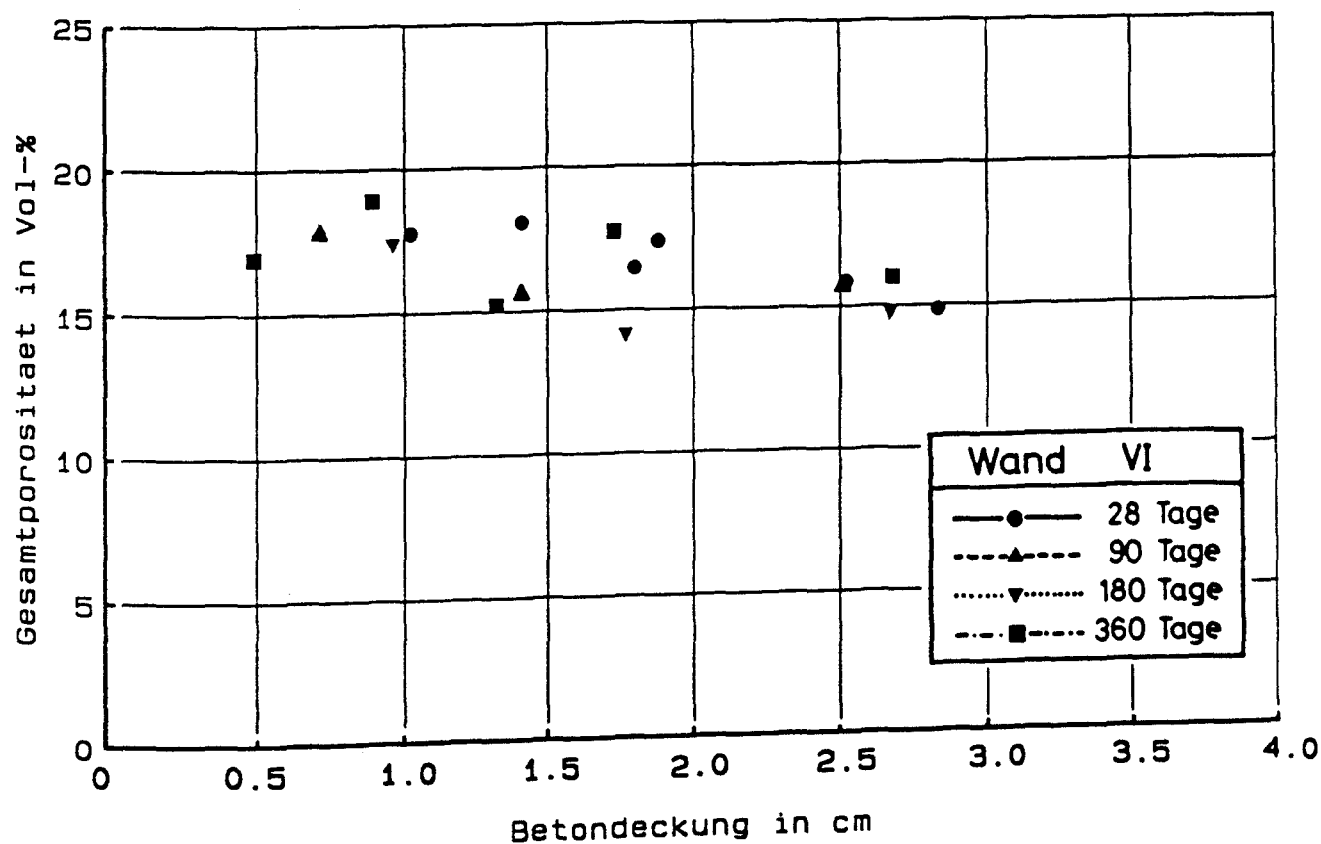


Bild 4.6.102 : Abhängigkeit der Gesamtporosität von der Dicke der Betondeckung für Wand VI.

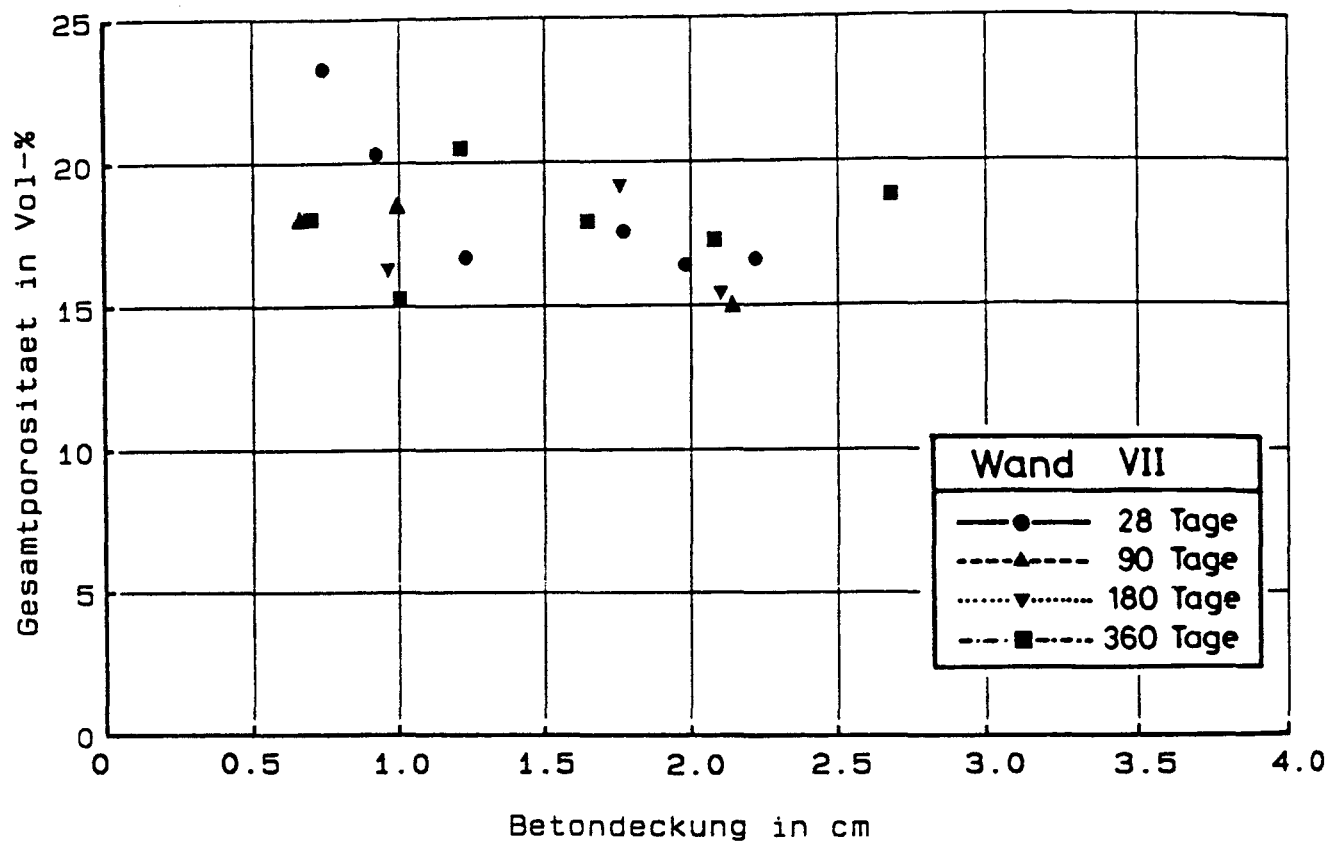


Bild 4.6.103 : Abhängigkeit der Gesamtporosität von der Dicke der Betondeckung für Wand VII.

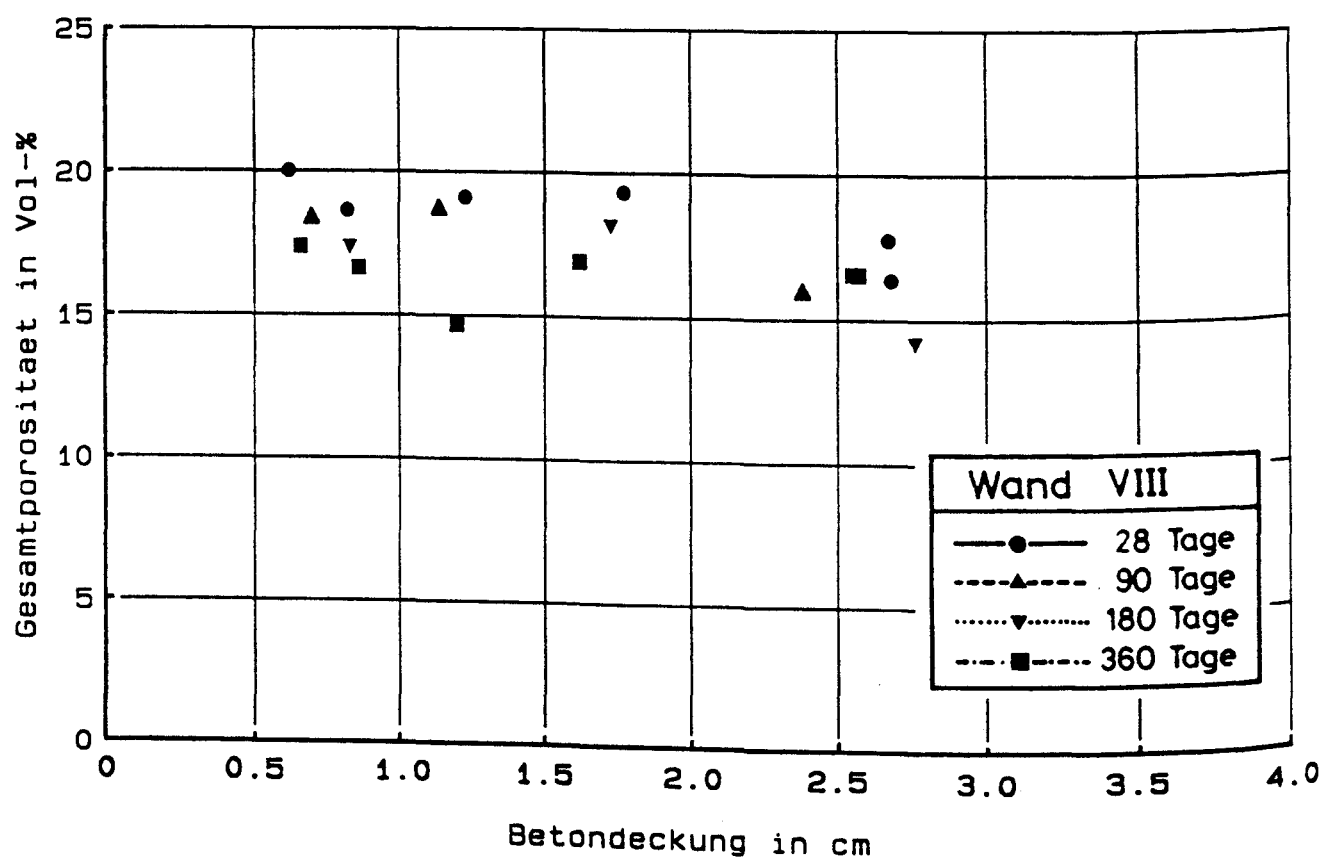


Bild 4.6.104 : Abhängigkeit der Gesamtporosität von der Dicke der Betondeckung für Wand VIII.

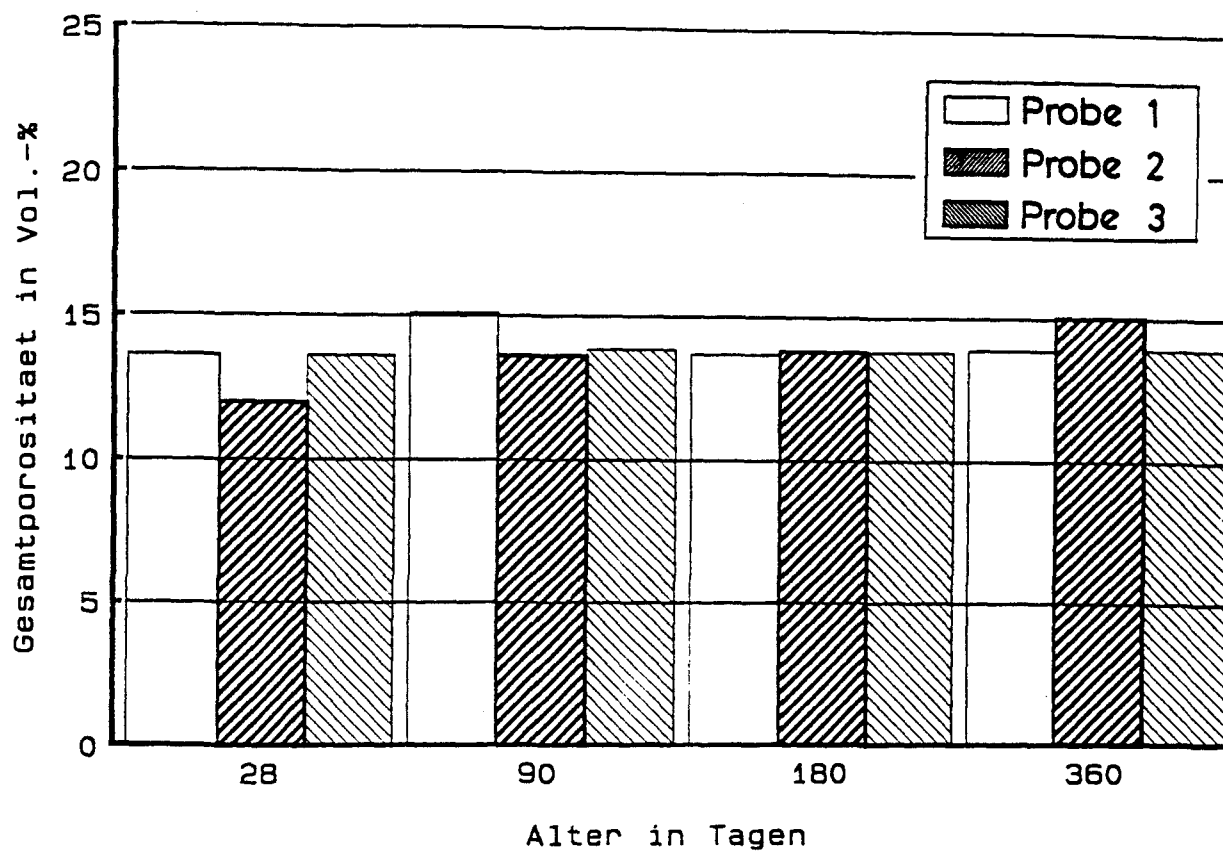


Bild 4.6.105 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand I. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

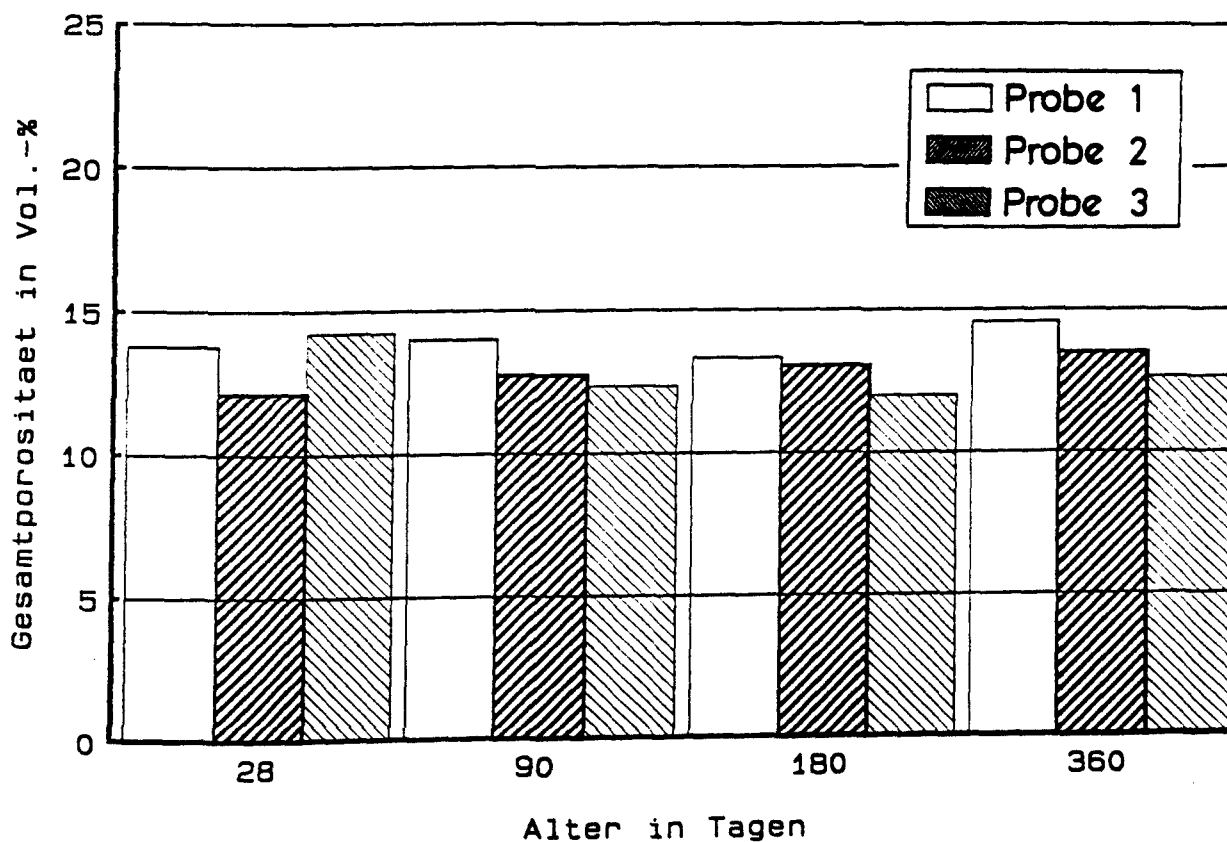


Bild 4.6.106 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand II. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

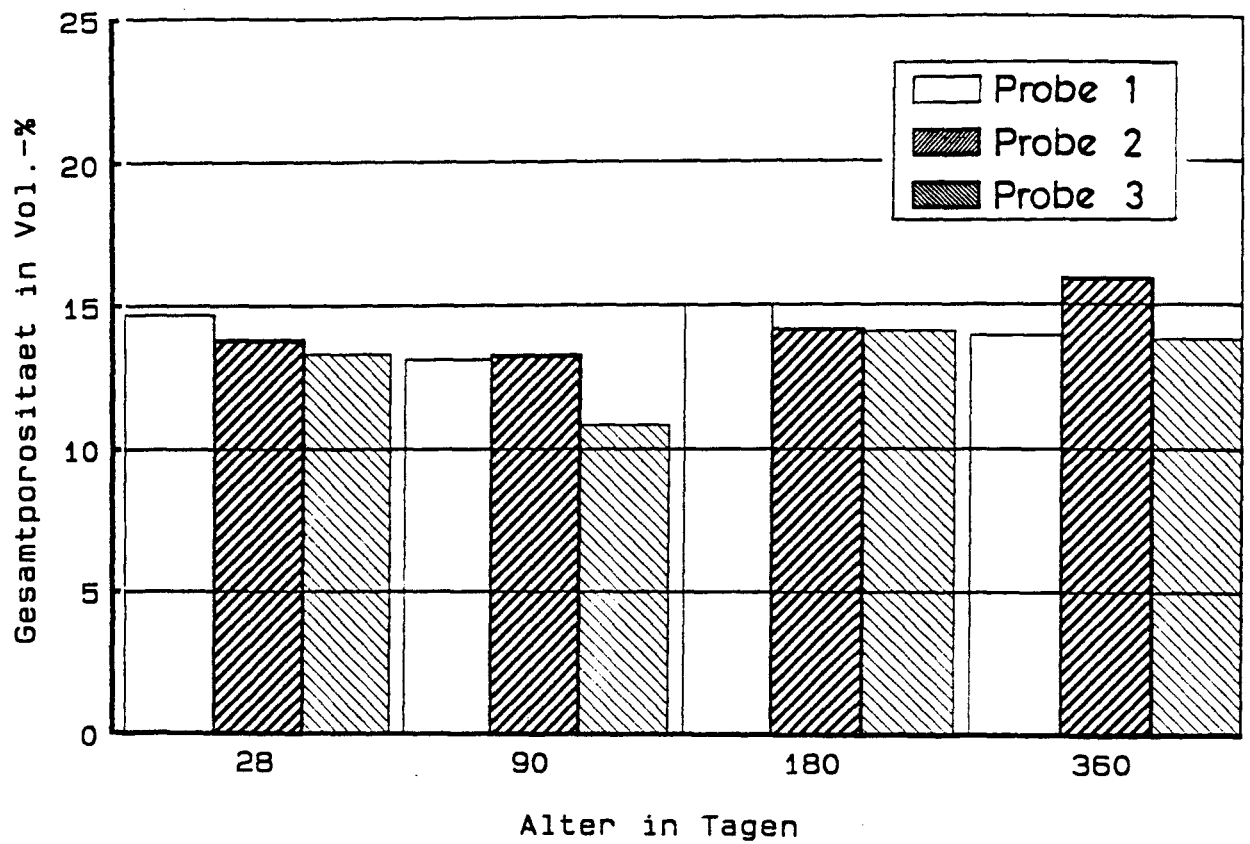


Bild 4.6.107 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand III. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

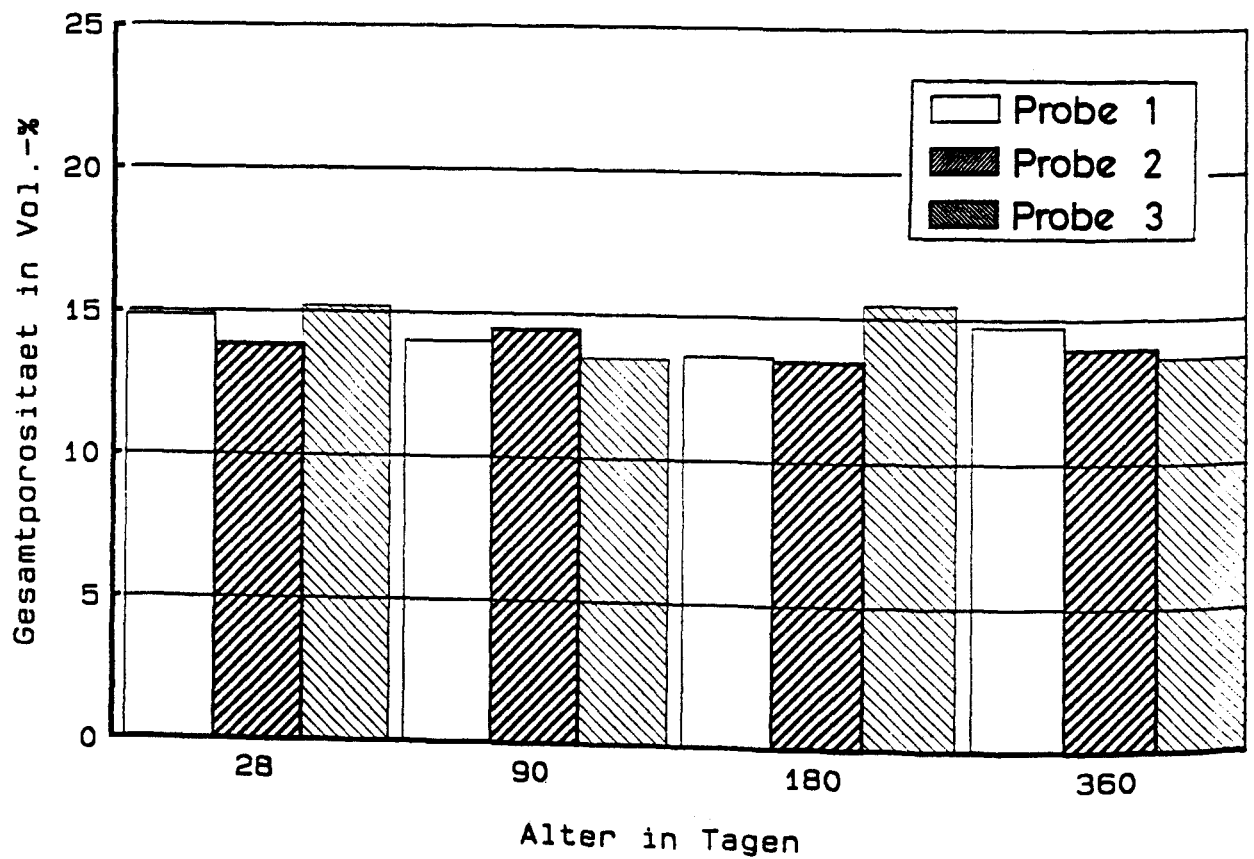


Bild 4.6.108 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand IV. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

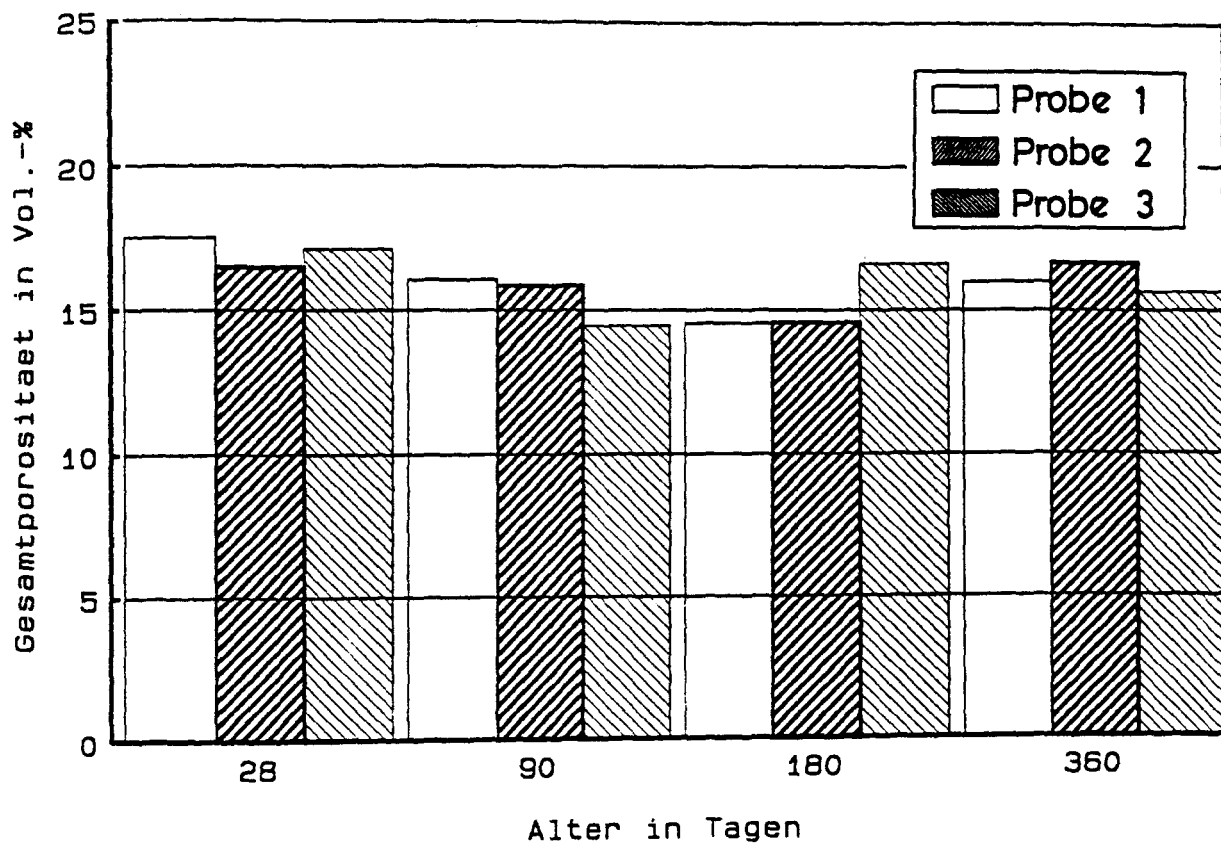


Bild 4.6.109 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand V. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

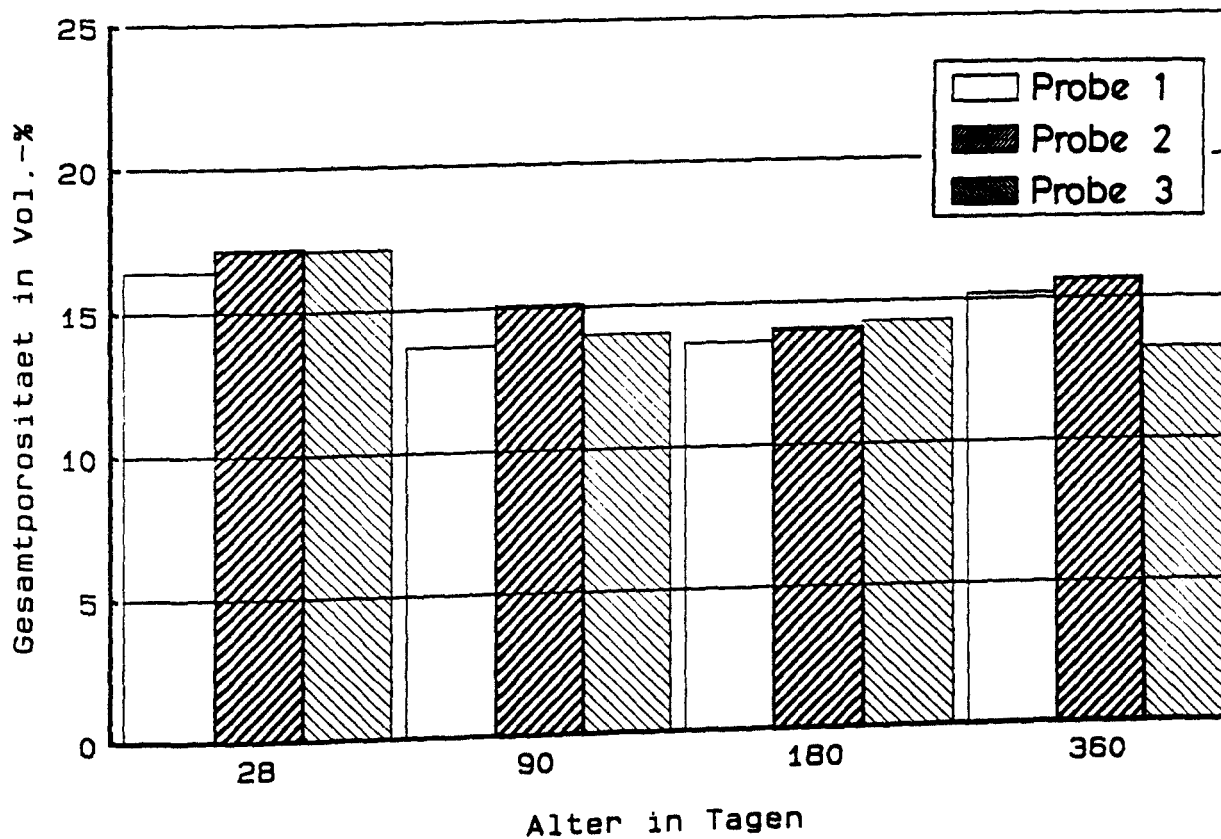


Bild 4.6.110 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand VI. (Wandmitte, Probendicke ca. 30 mm)

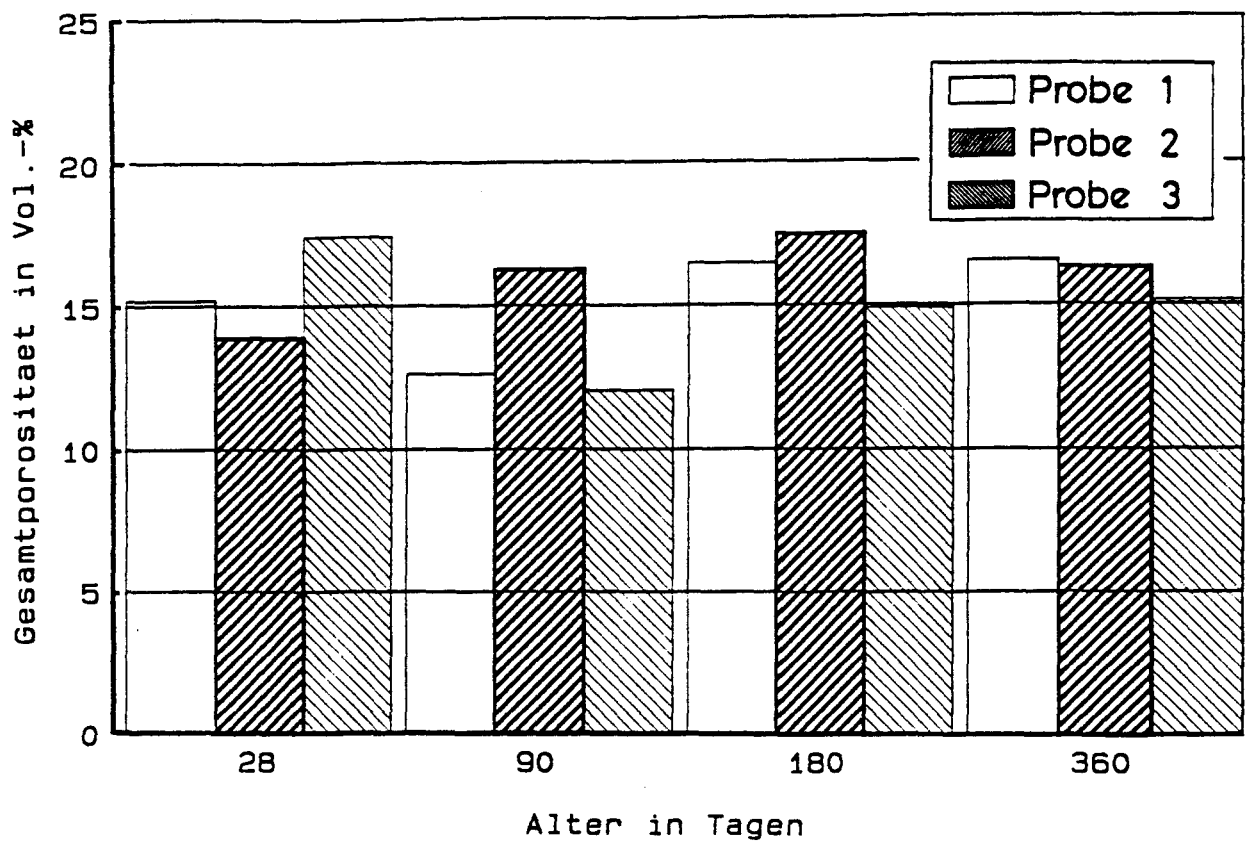


Bild 4.6.115 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand III. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

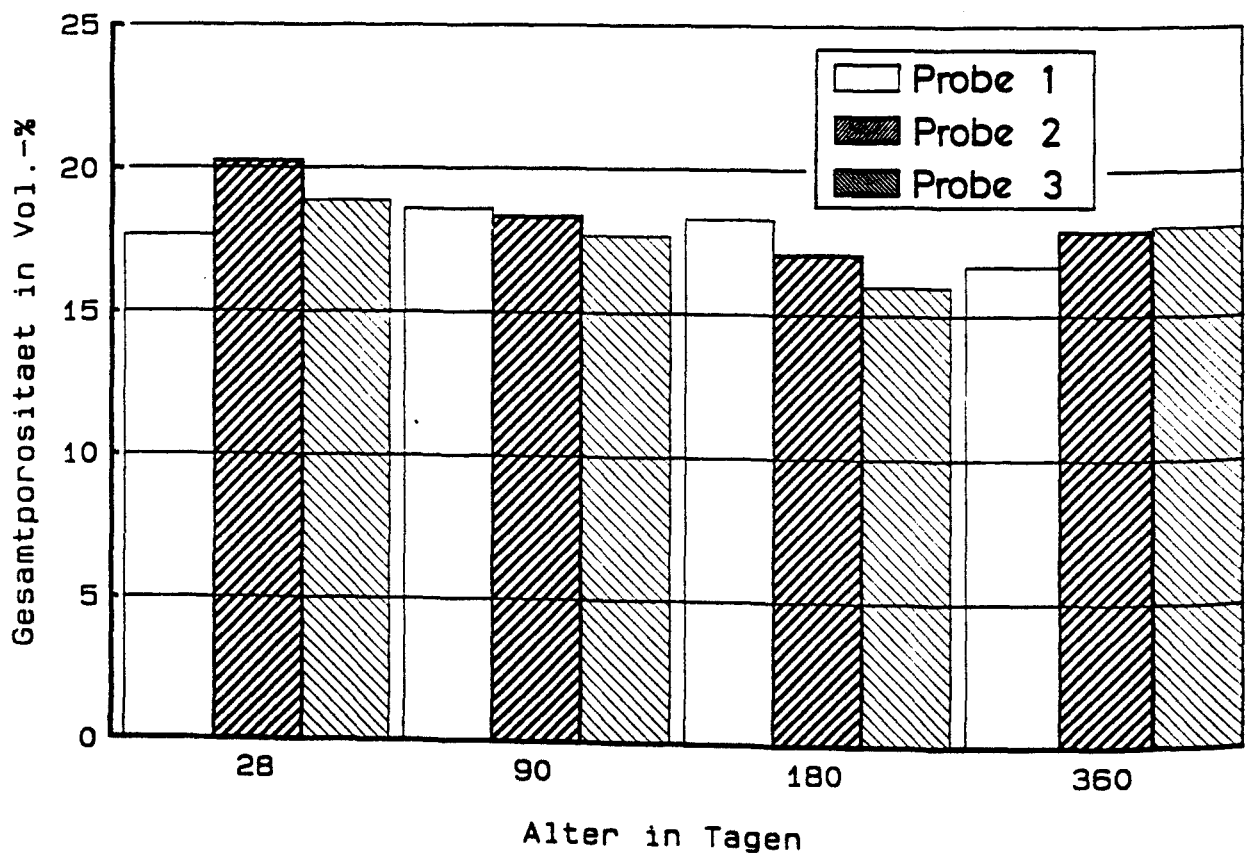


Bild 4.6.116 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand IV. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

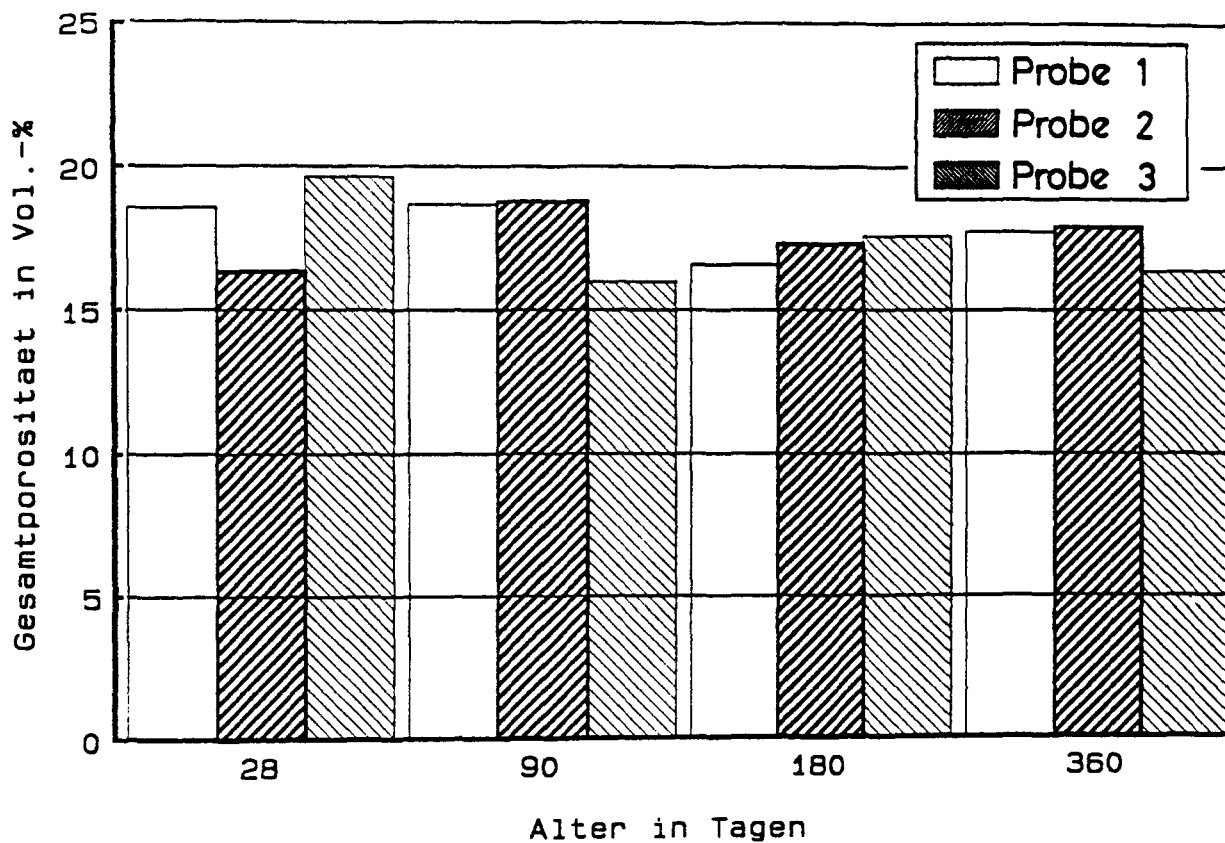


Bild 4.6.117 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand V. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

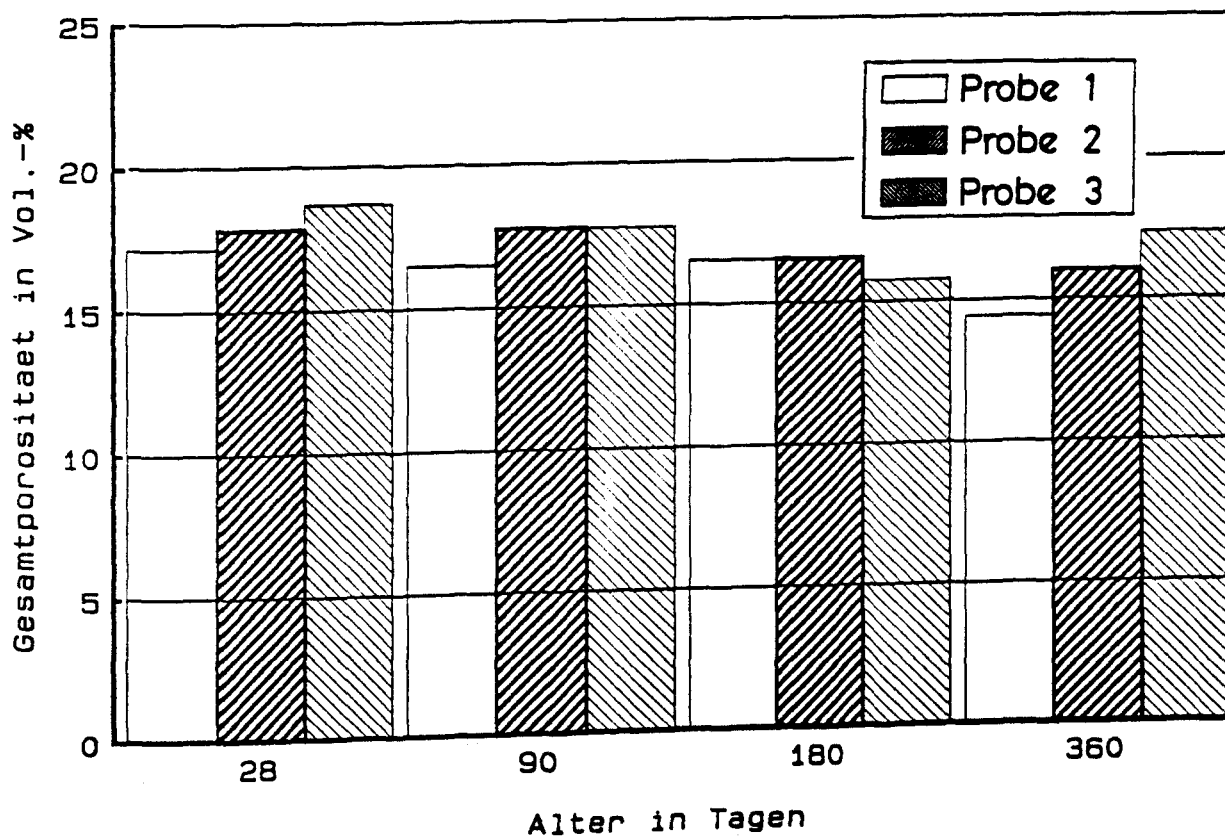


Bild 4.6.118 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand VI. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

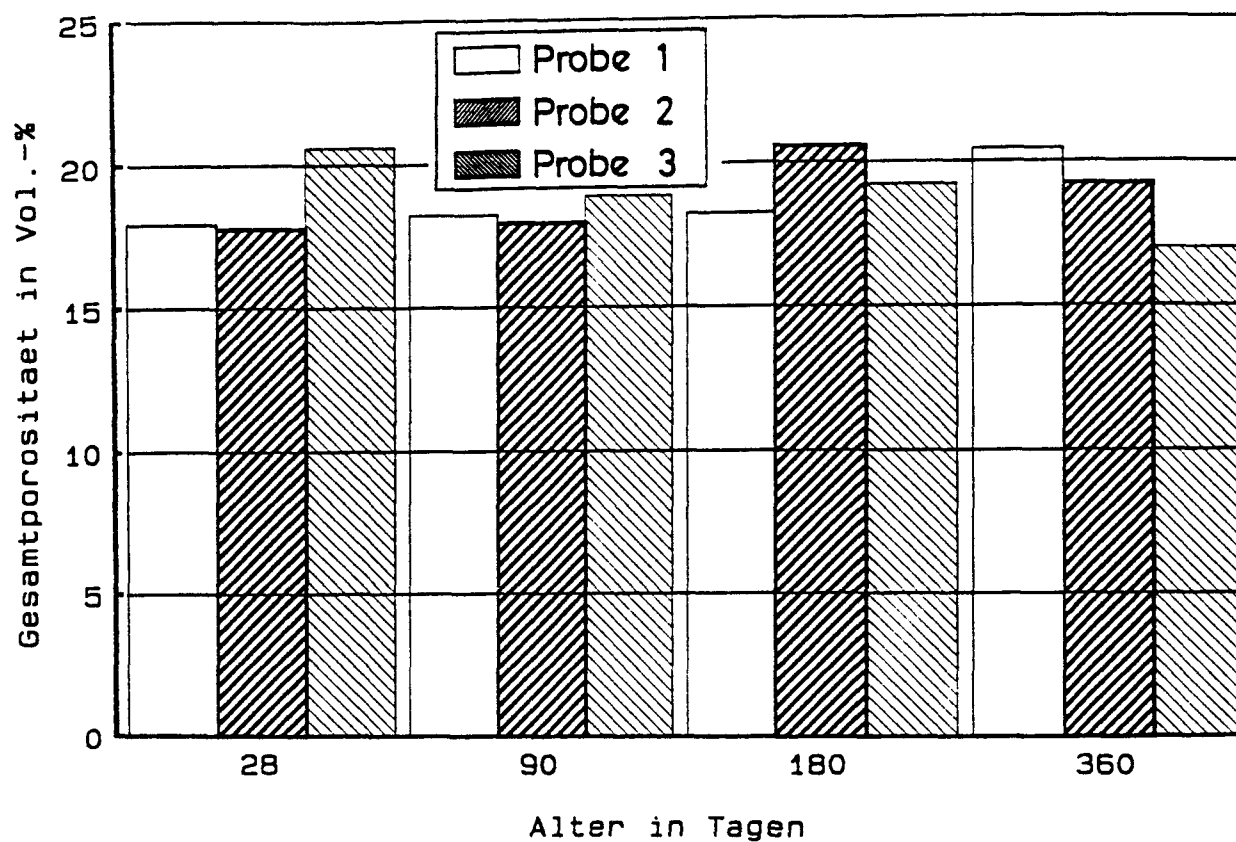


Bild 4.6.119 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand VII. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

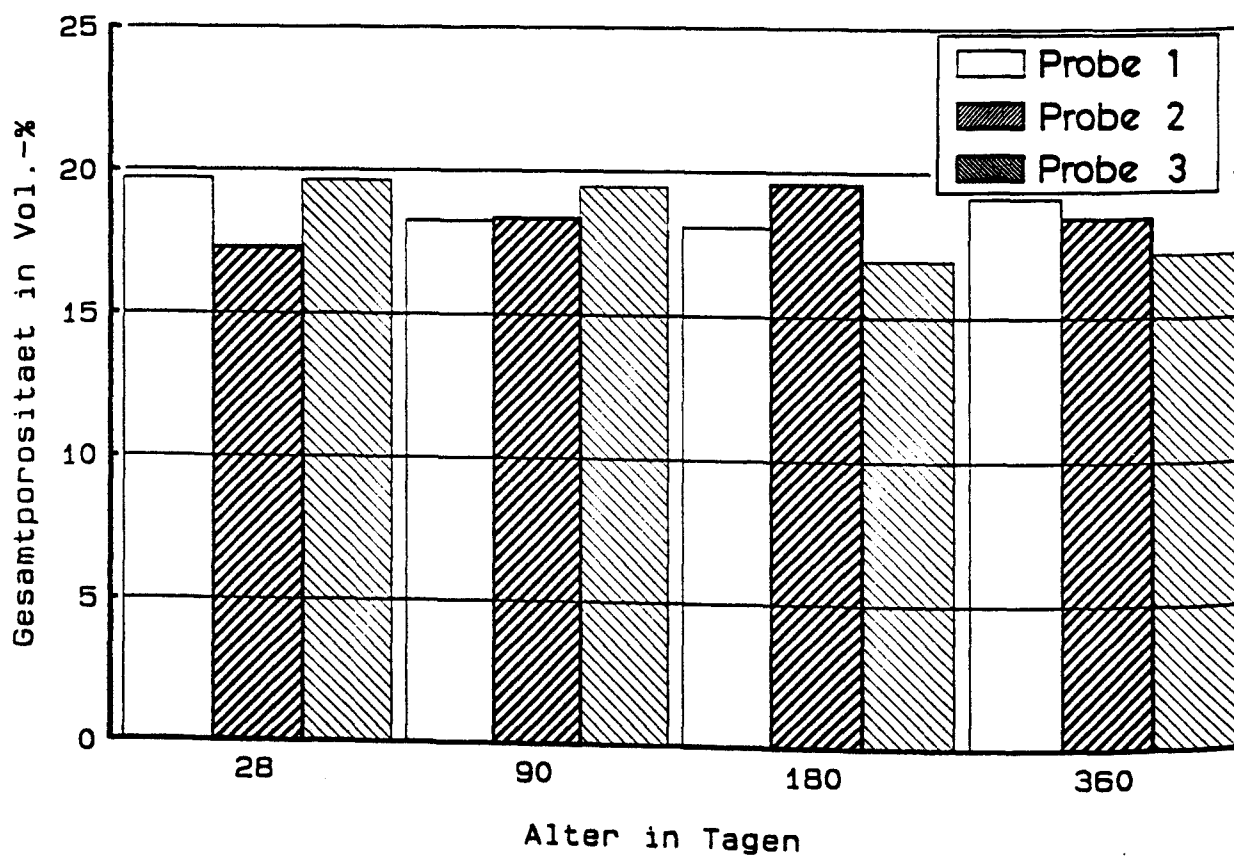


Bild 4.6.120 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand VIII. (Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite, Probendicke ca. 30 mm)

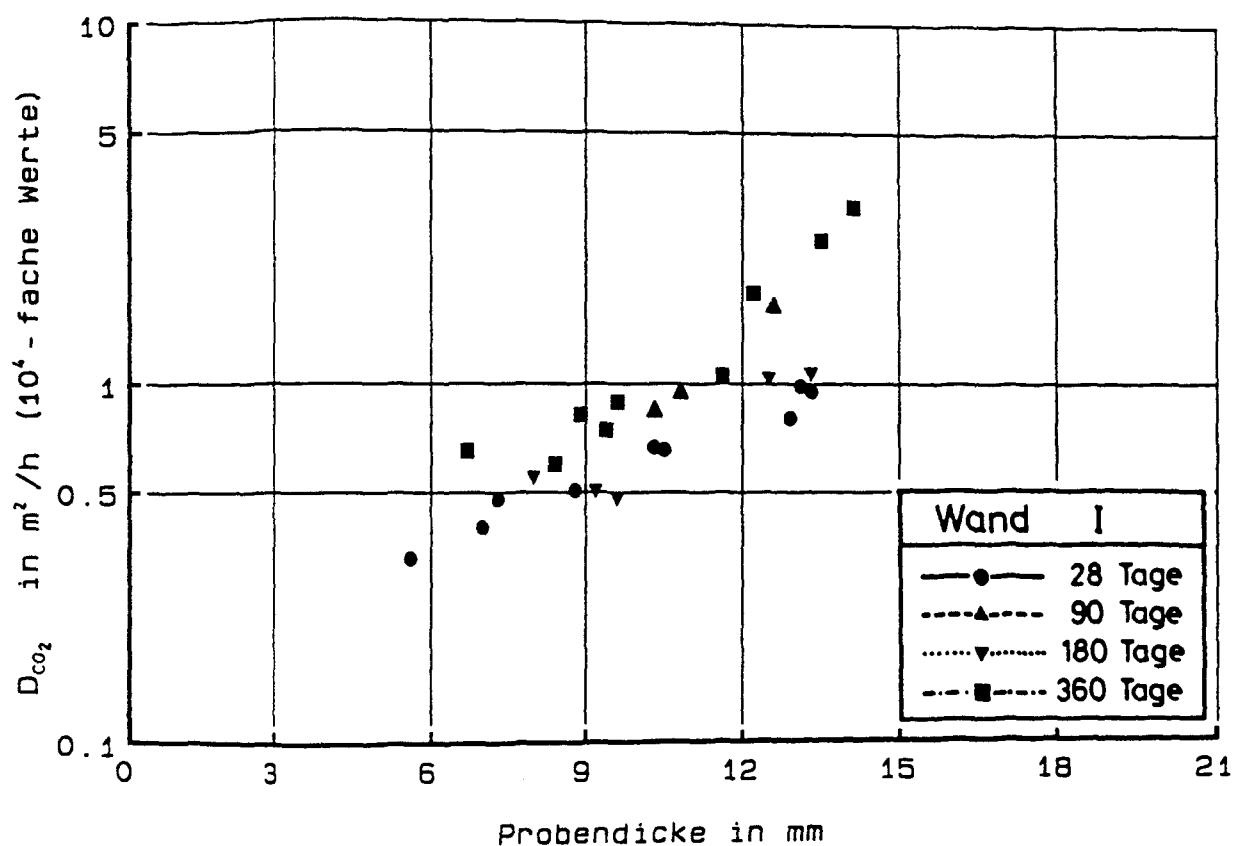


Bild 4.6.121 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand I, alle Betondeckungen)

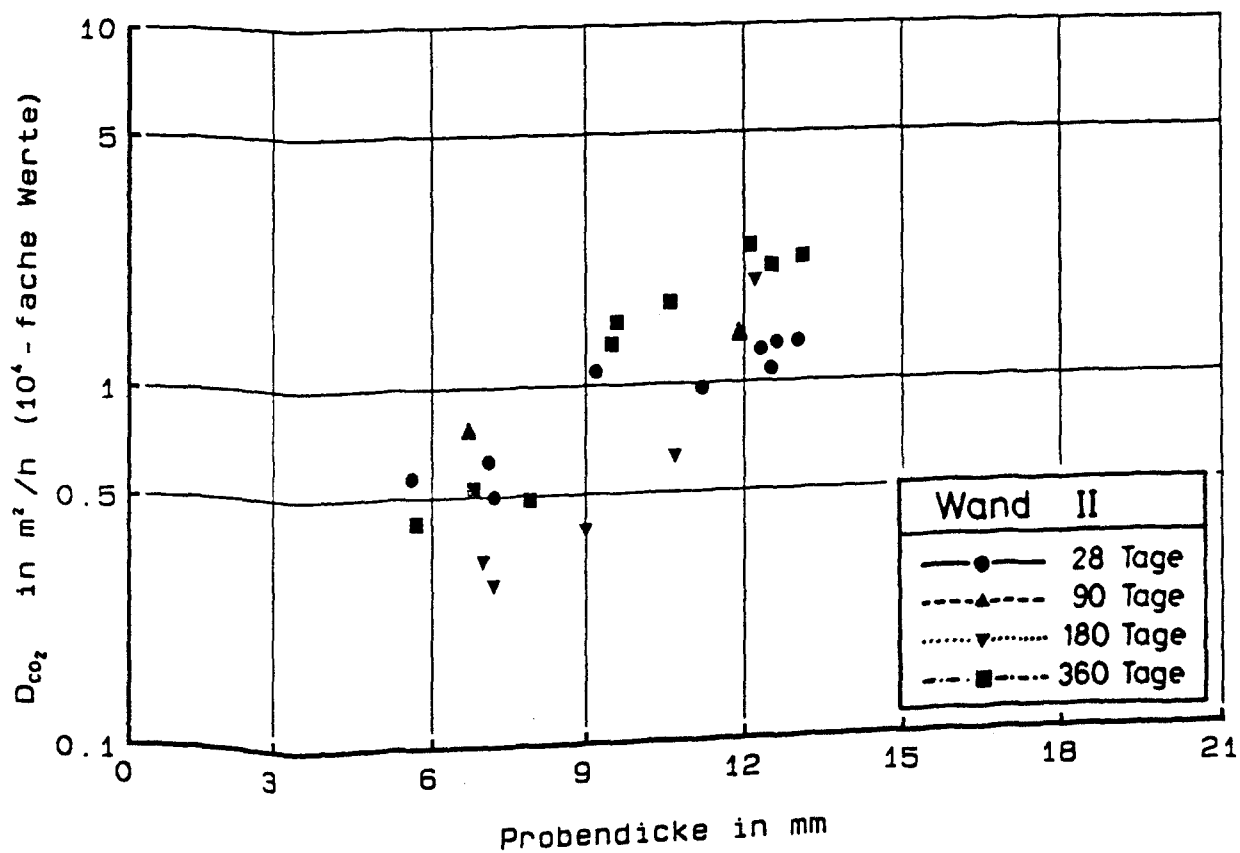


Bild 4.6.122 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand II, alle Betondeckungen)

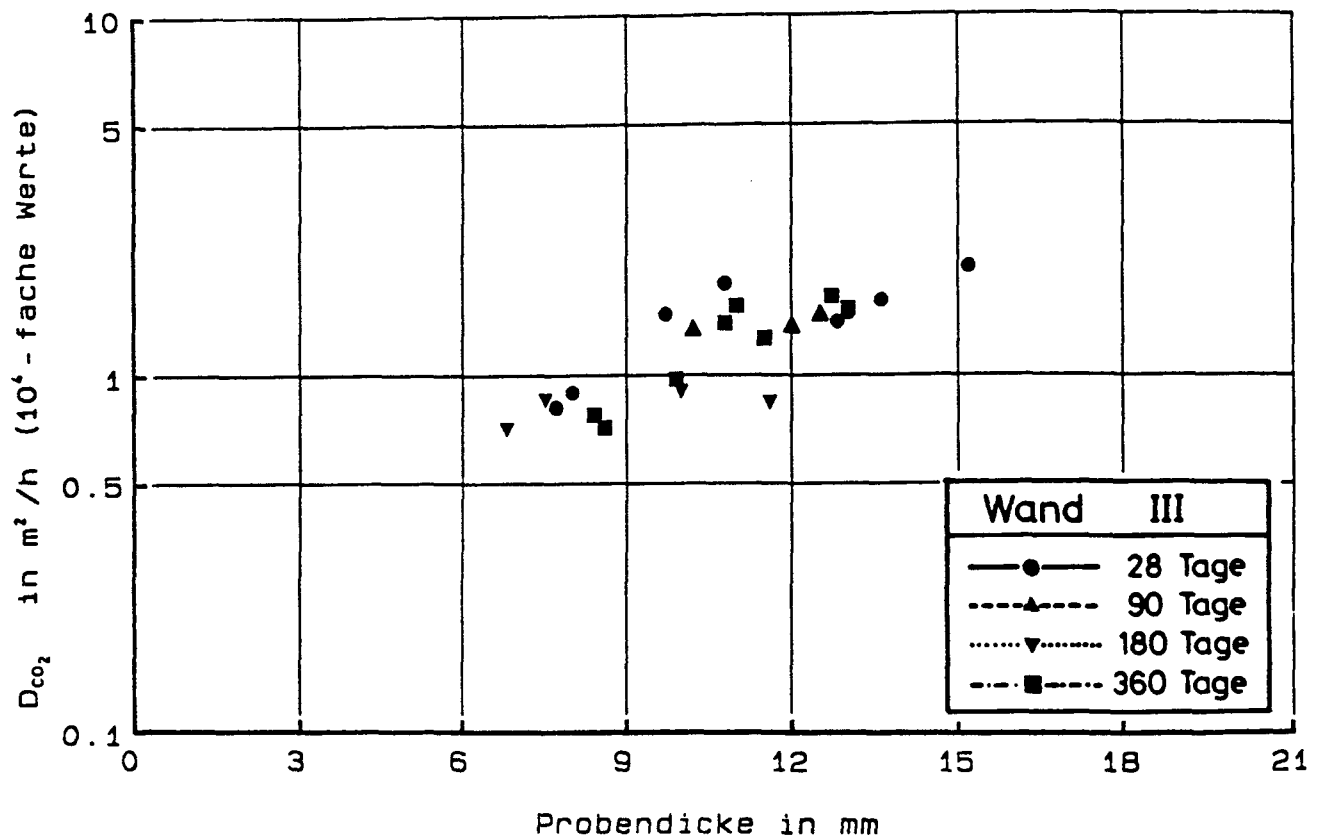


Bild 4.6.123 : Abhängigkeit des CO₂-Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand III, alle Betondeckungen)

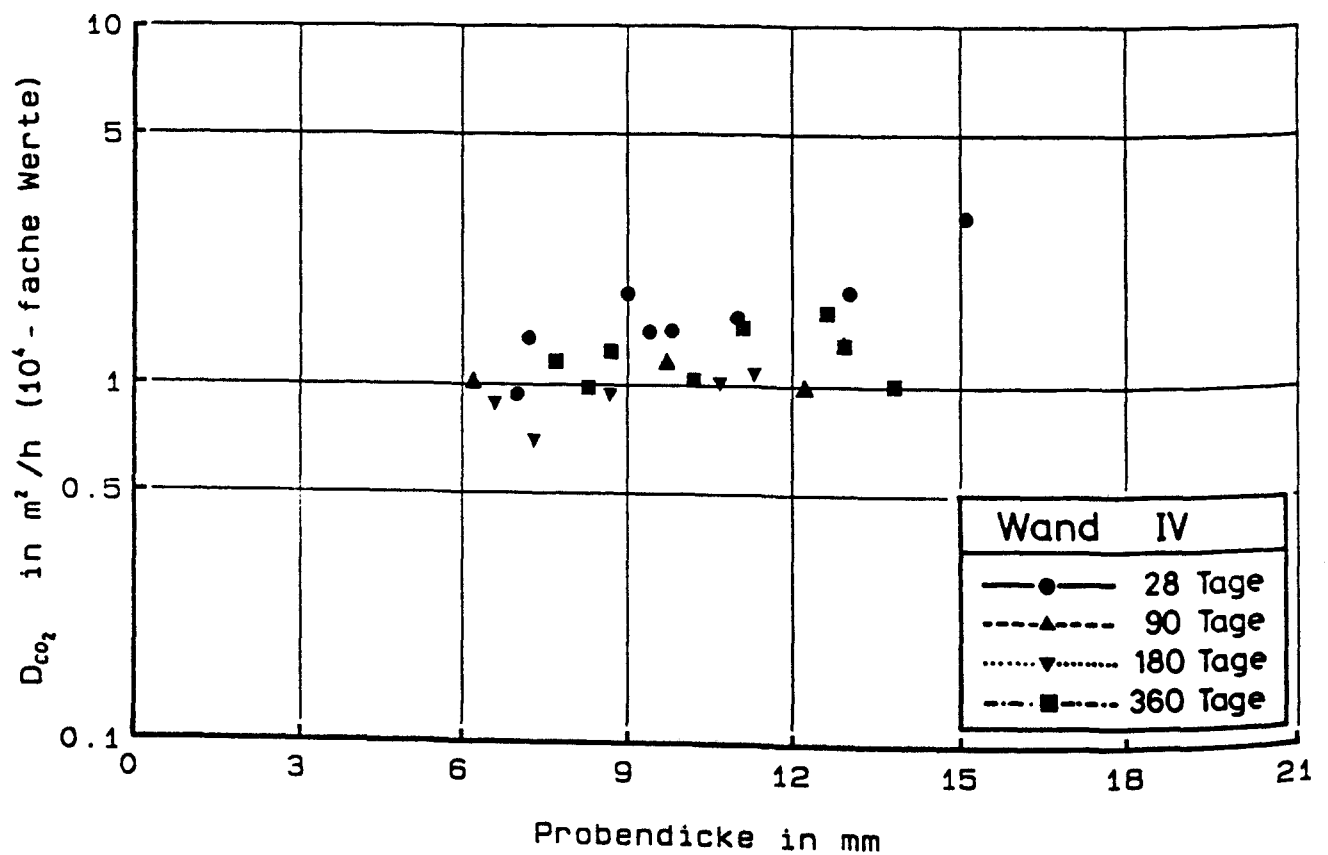


Bild 4.6.124 : Abhängigkeit des CO₂-Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand IV, alle Betondeckungen)

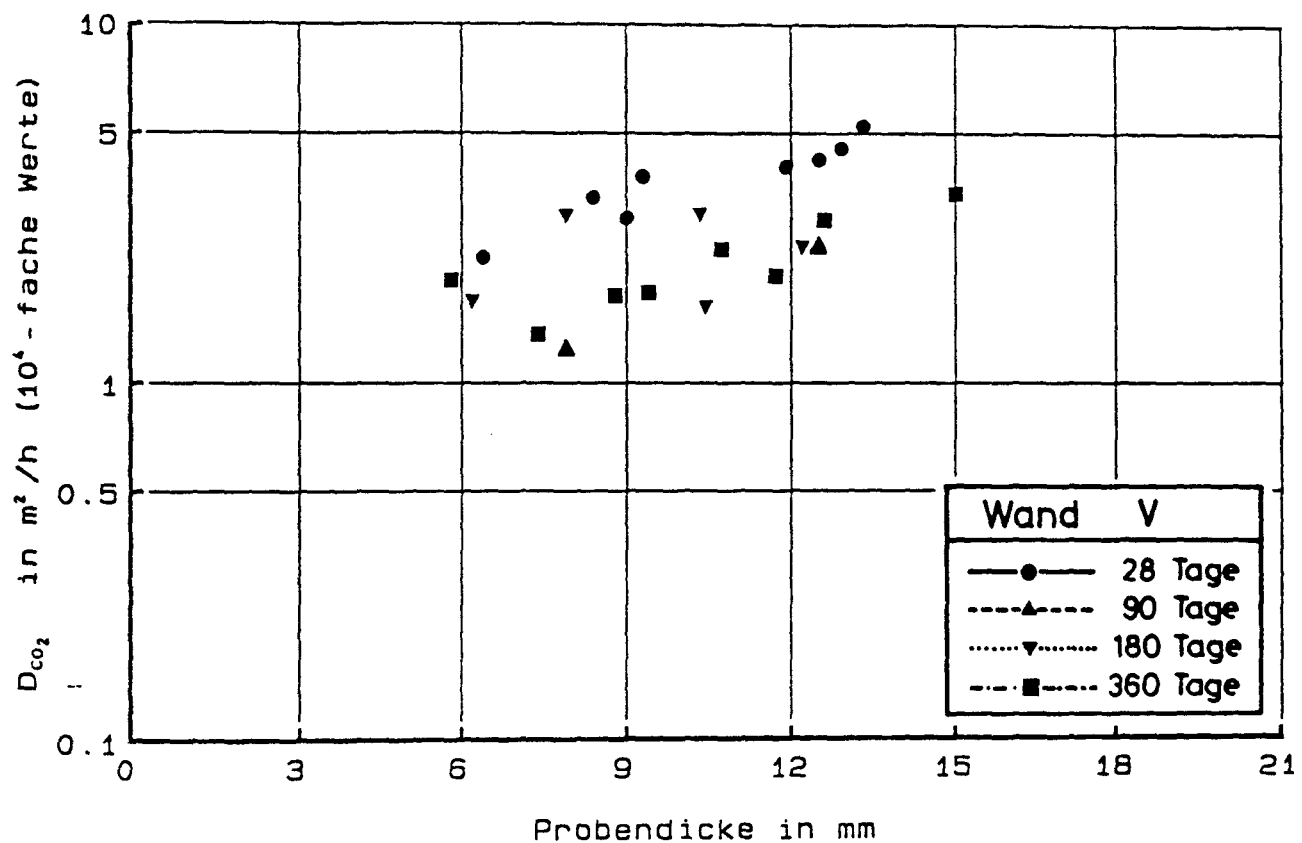


Bild 4.6.125 : Abhängigkeit des CO₂-Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand V, alle Betondeckungen)

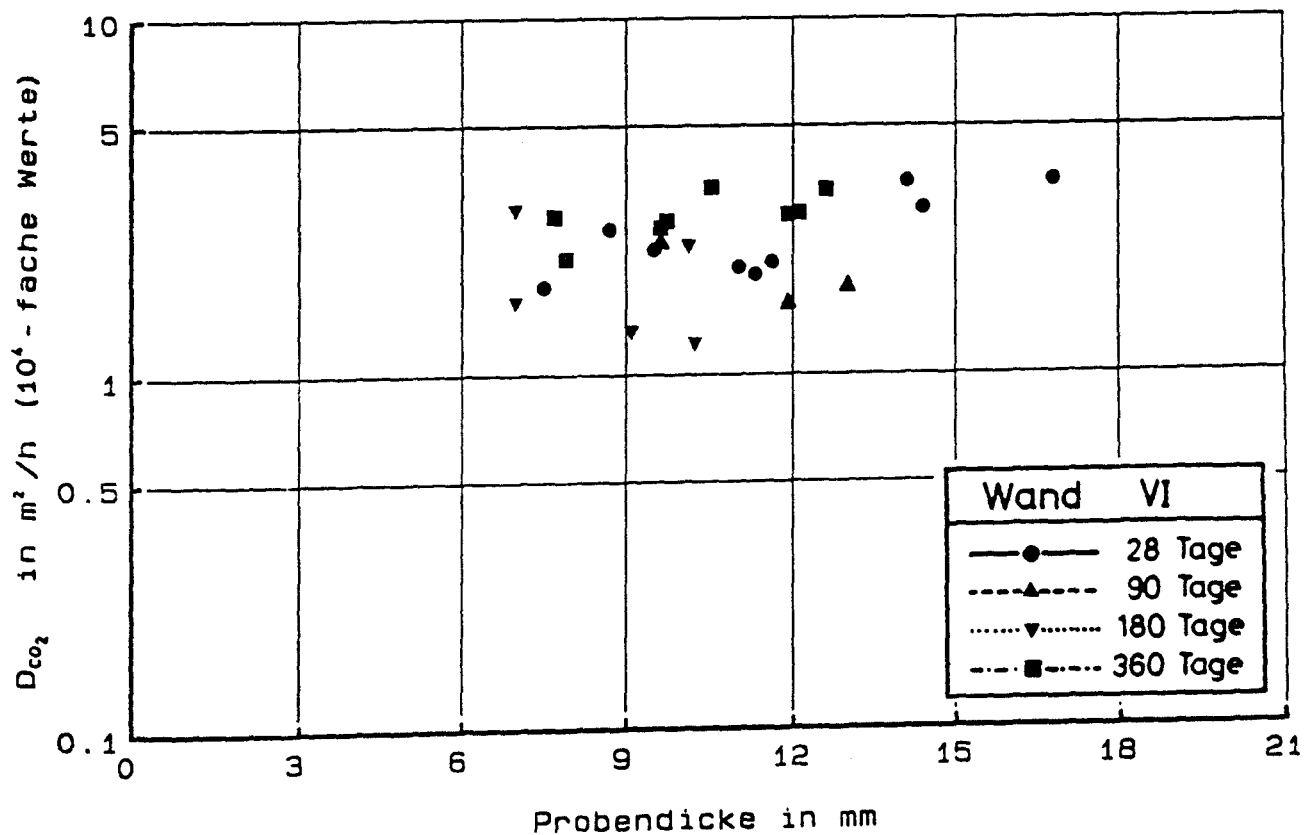


Bild 4.6.126 : Abhängigkeit des CO₂-Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand VI, alle Betondeckungen)

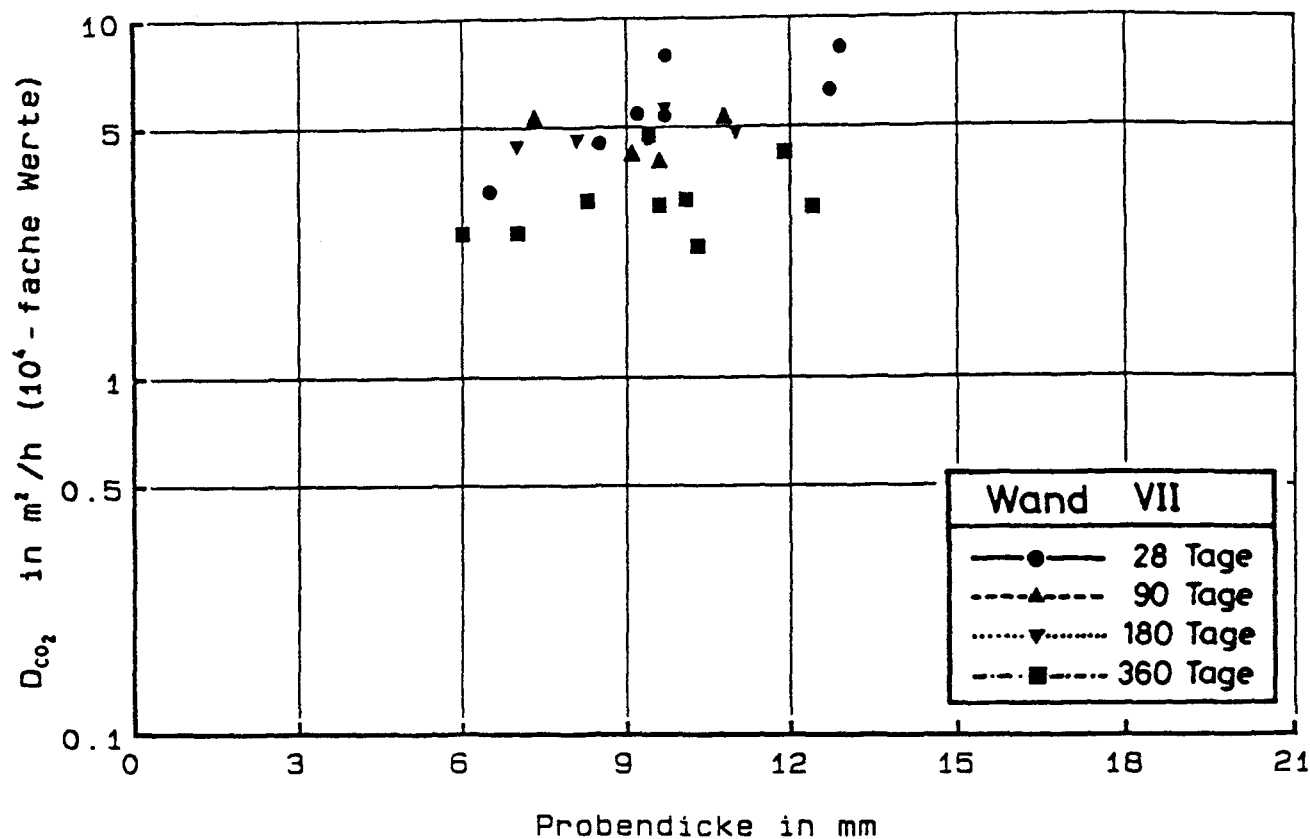


Bild 4.6.127 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand VII, alle Betondeckungen)

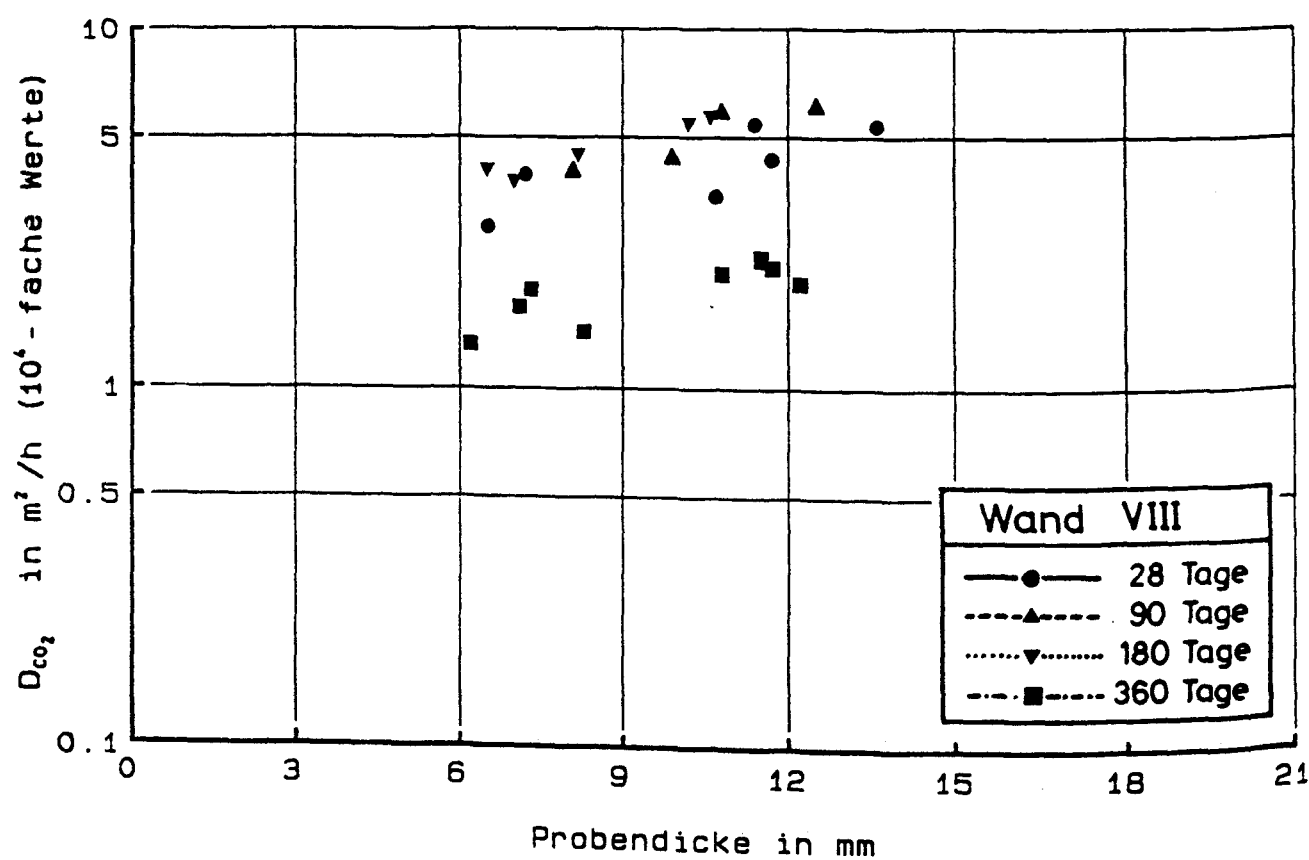


Bild 4.6.128 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand VIII, alle Betondeckungen)

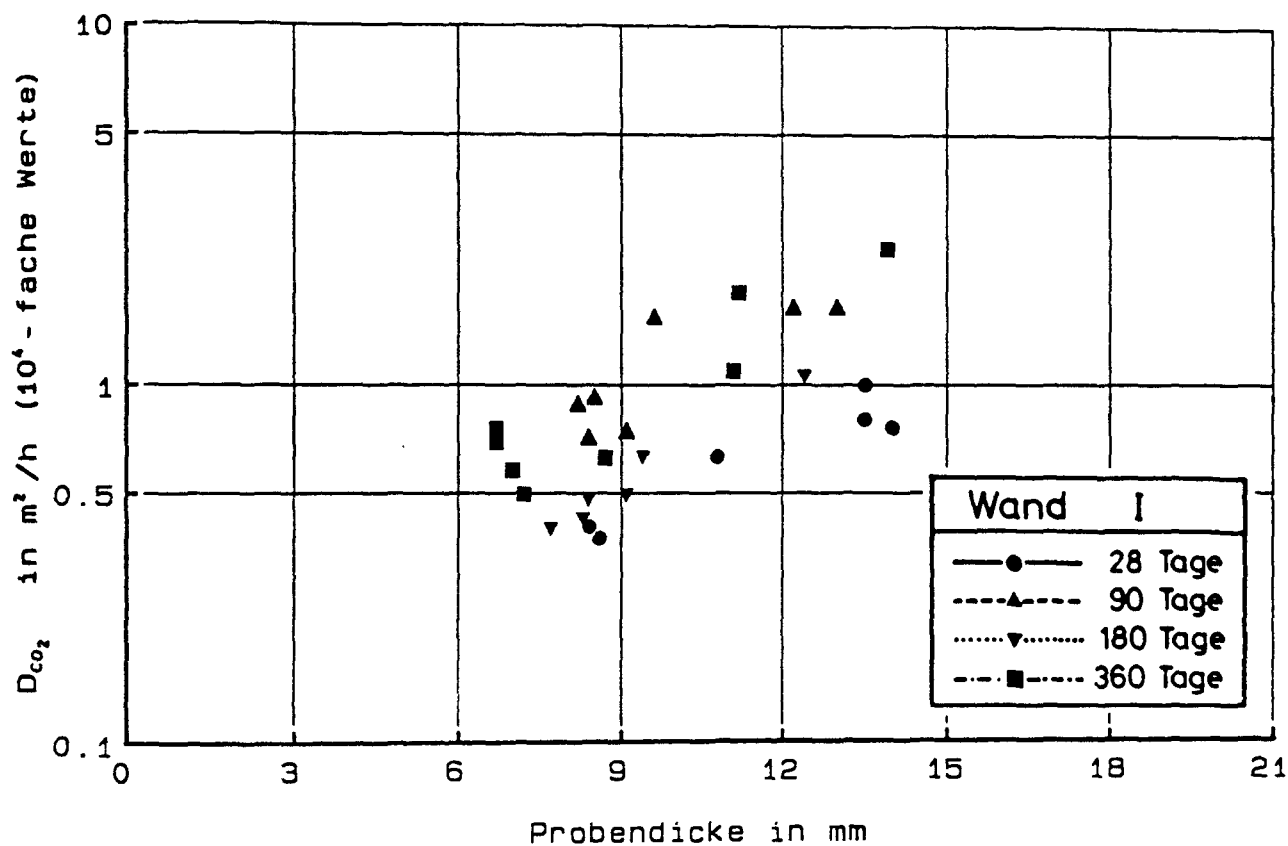


Bild 4.6.129 : Abhängigkeit des CO₂-Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand I, Wandmitte)

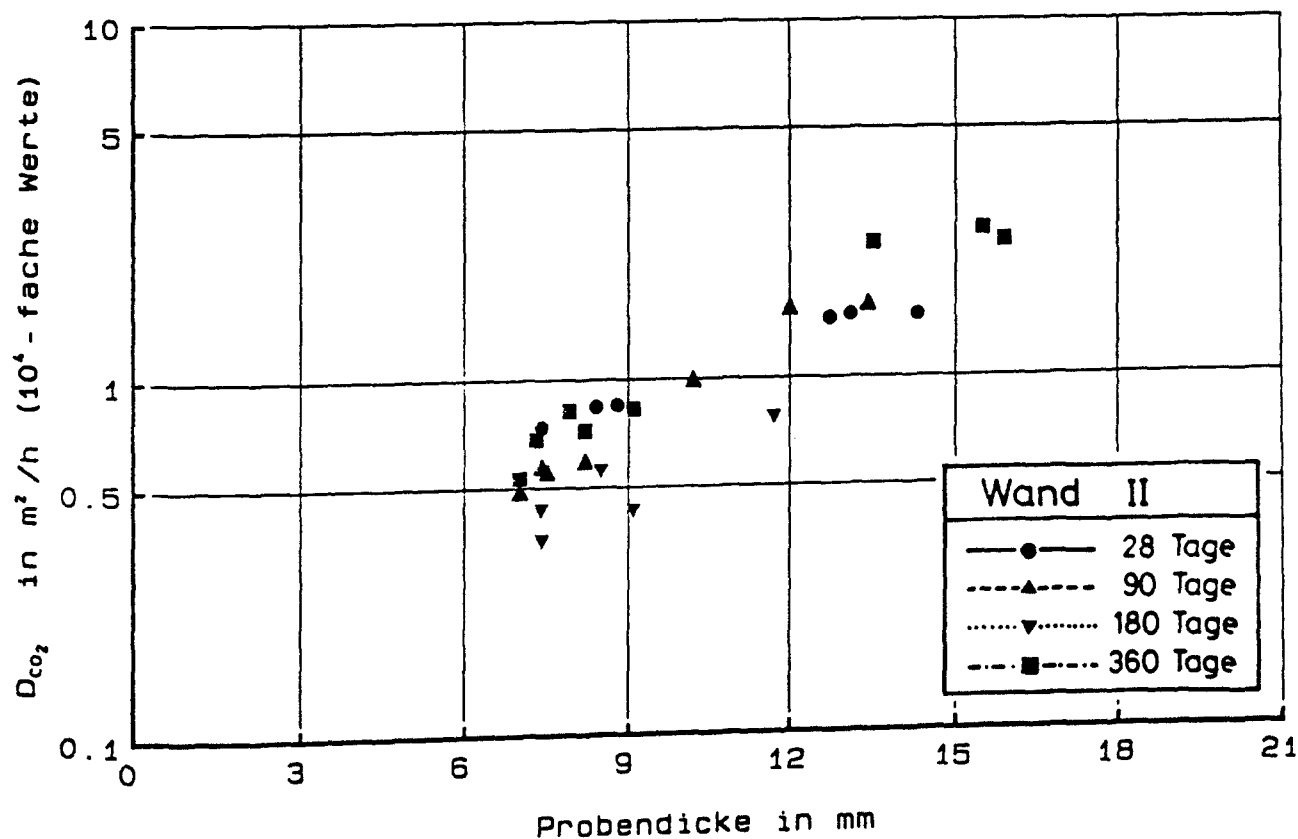


Bild 4.6.130 : Abhängigkeit des CO₂-Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand II, Wandmitte)

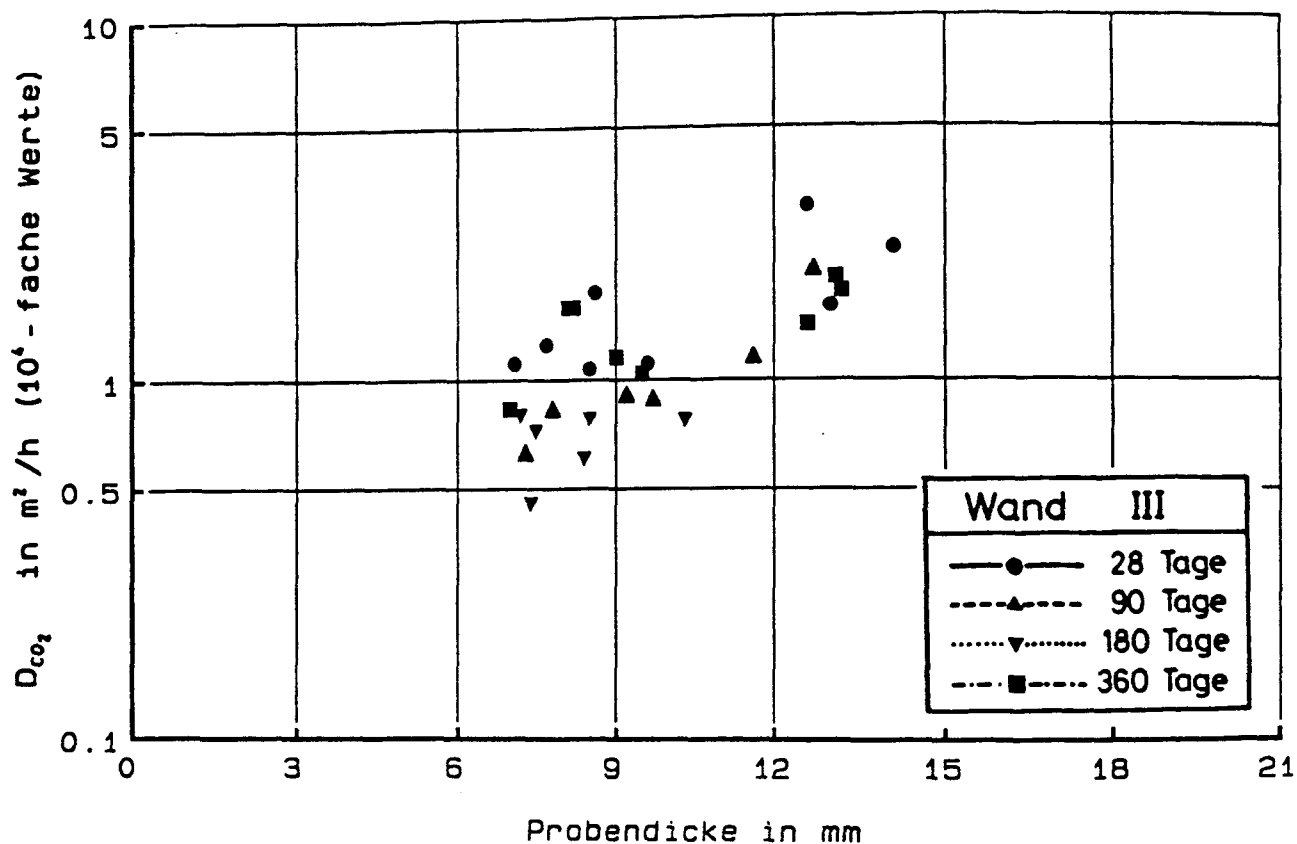


Bild 4.6.131 : Abhängigkeit des CO₂-Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand III, Wandmitte)

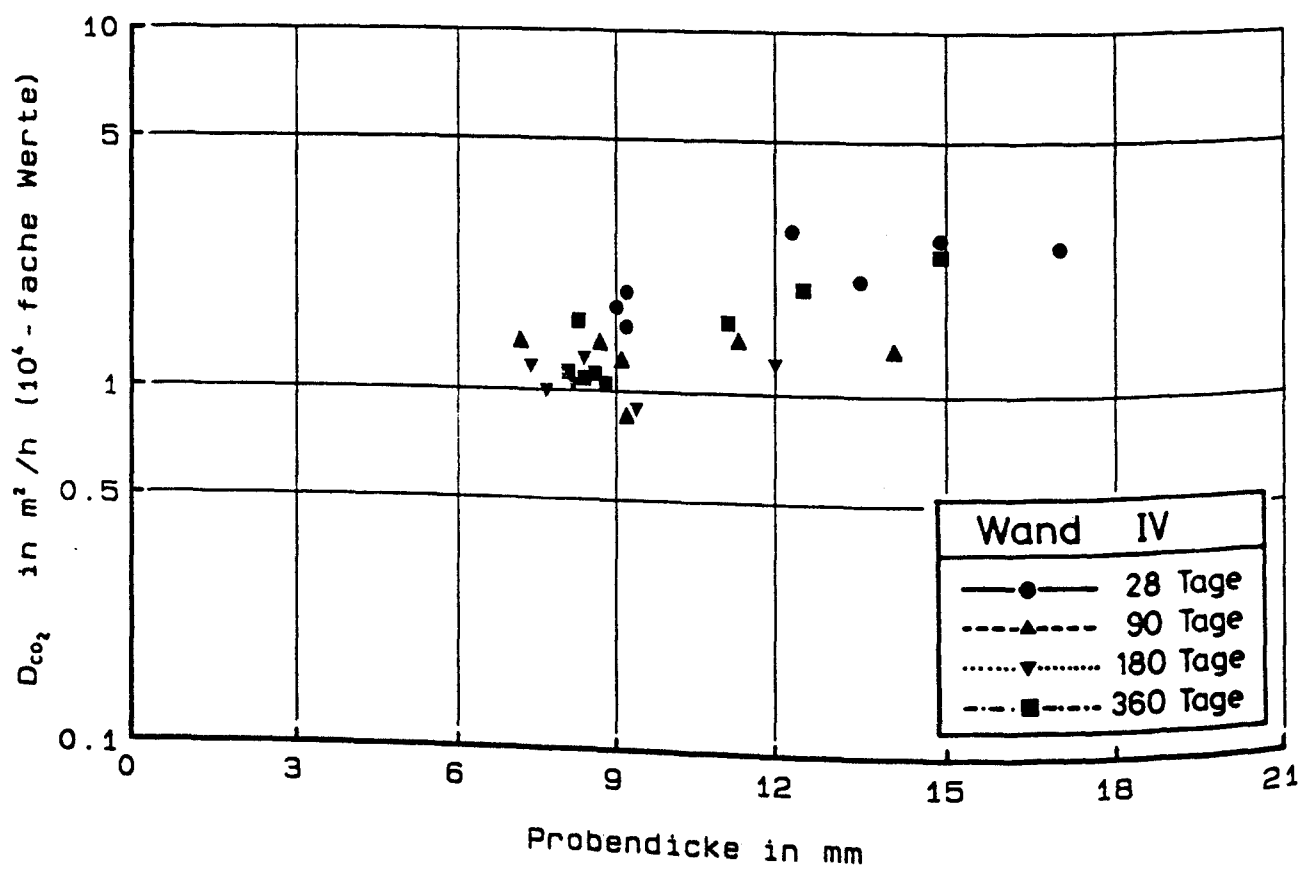


Bild 4.6.132 : Abhängigkeit des CO₂-Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand IV, Wandmitte)

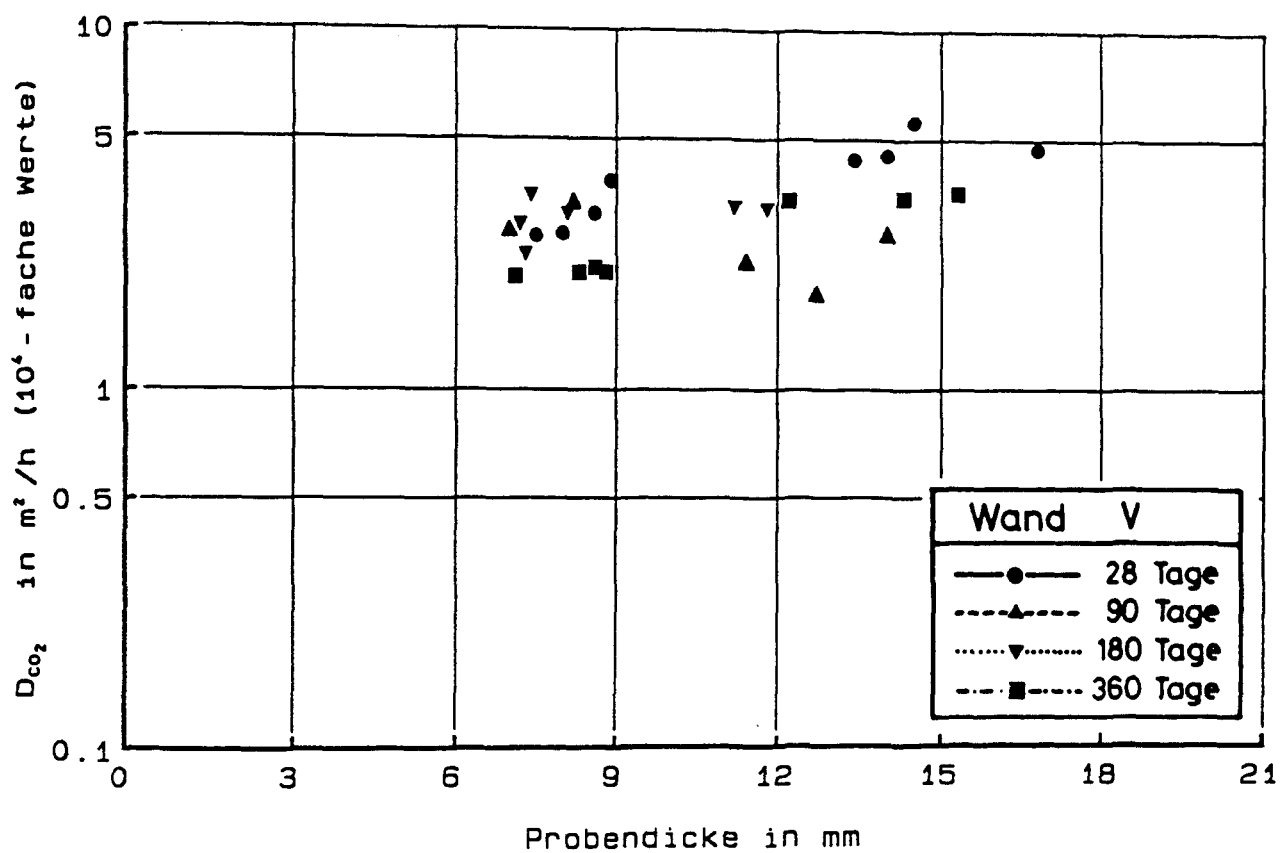


Bild 4.6.133 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand V, Wandmitte)

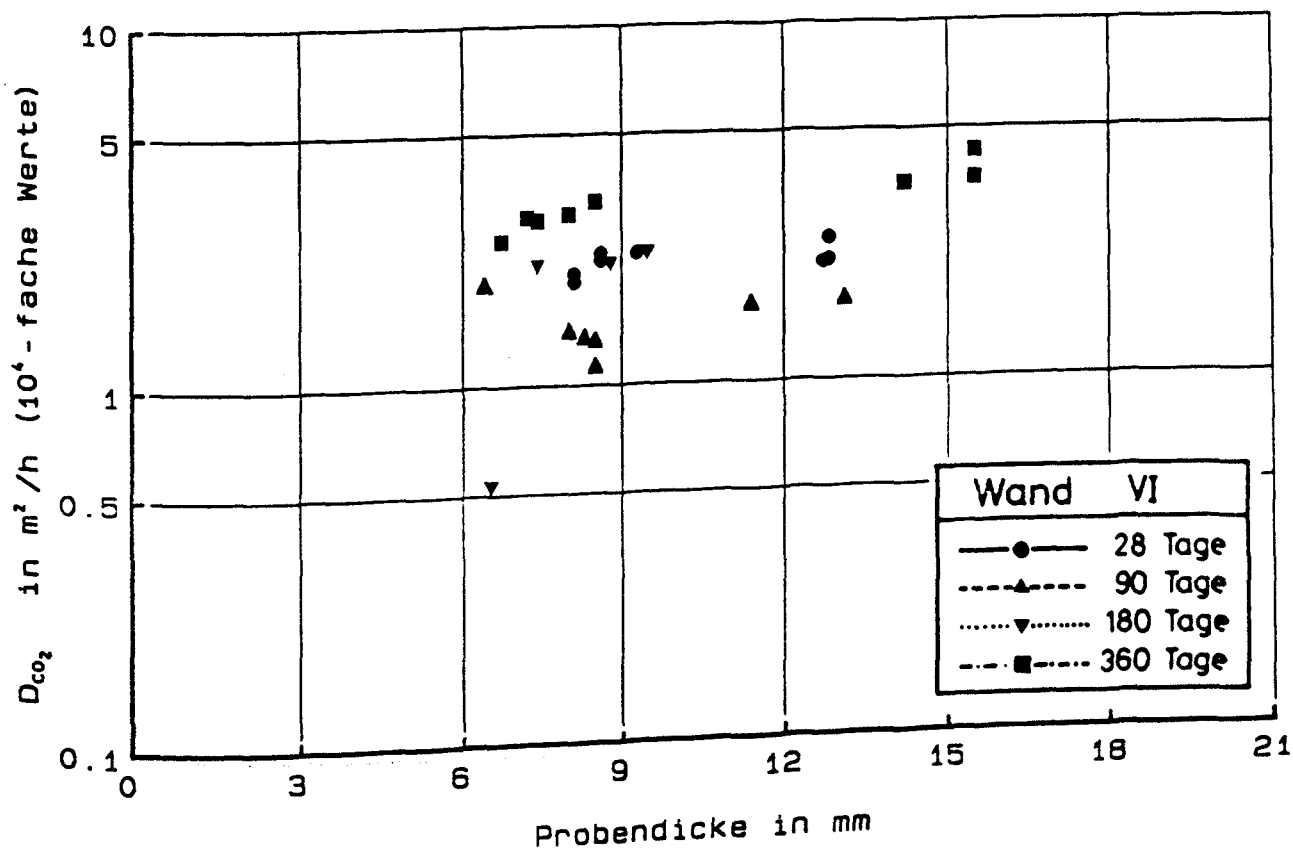


Bild 4.6.134 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand VI, Wandmitte)

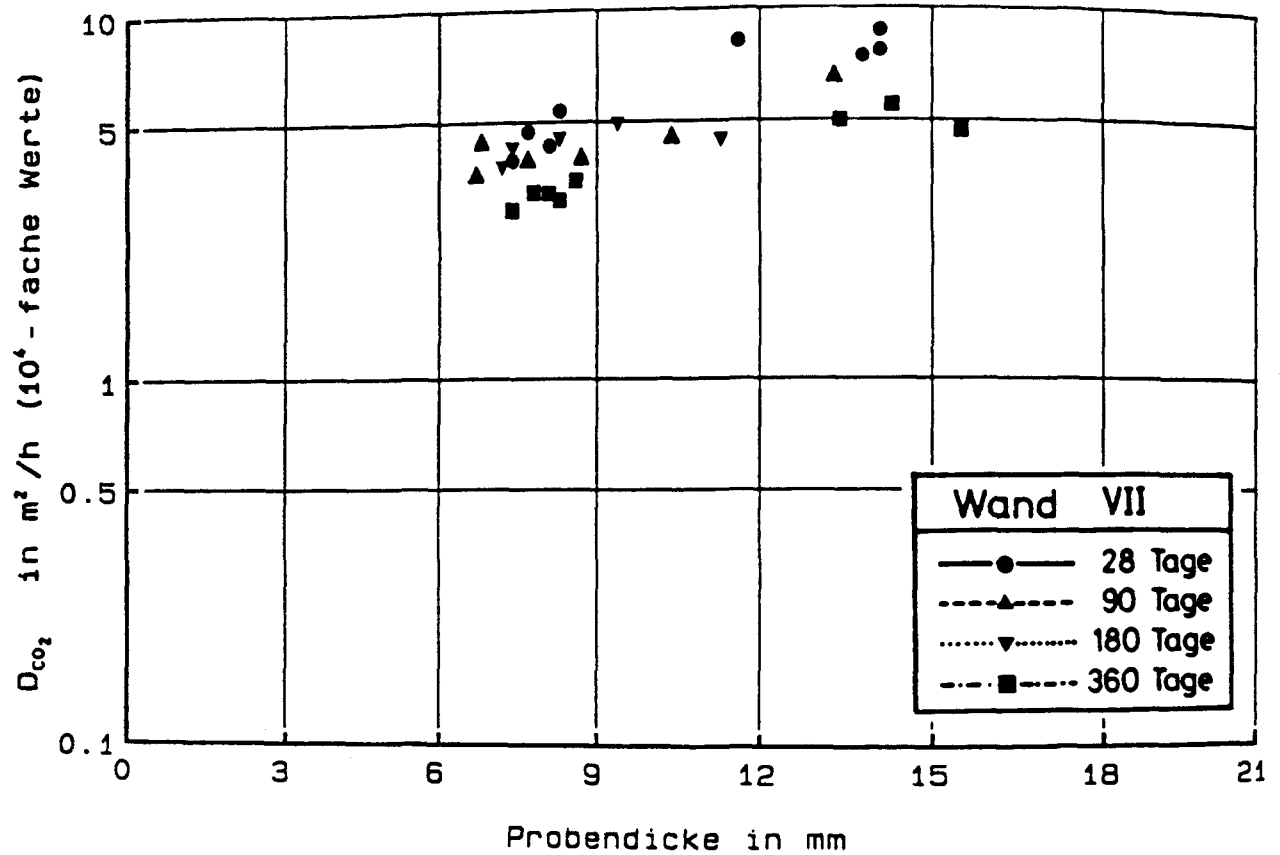


Bild 4.6.135 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand VII, Wandmitte)

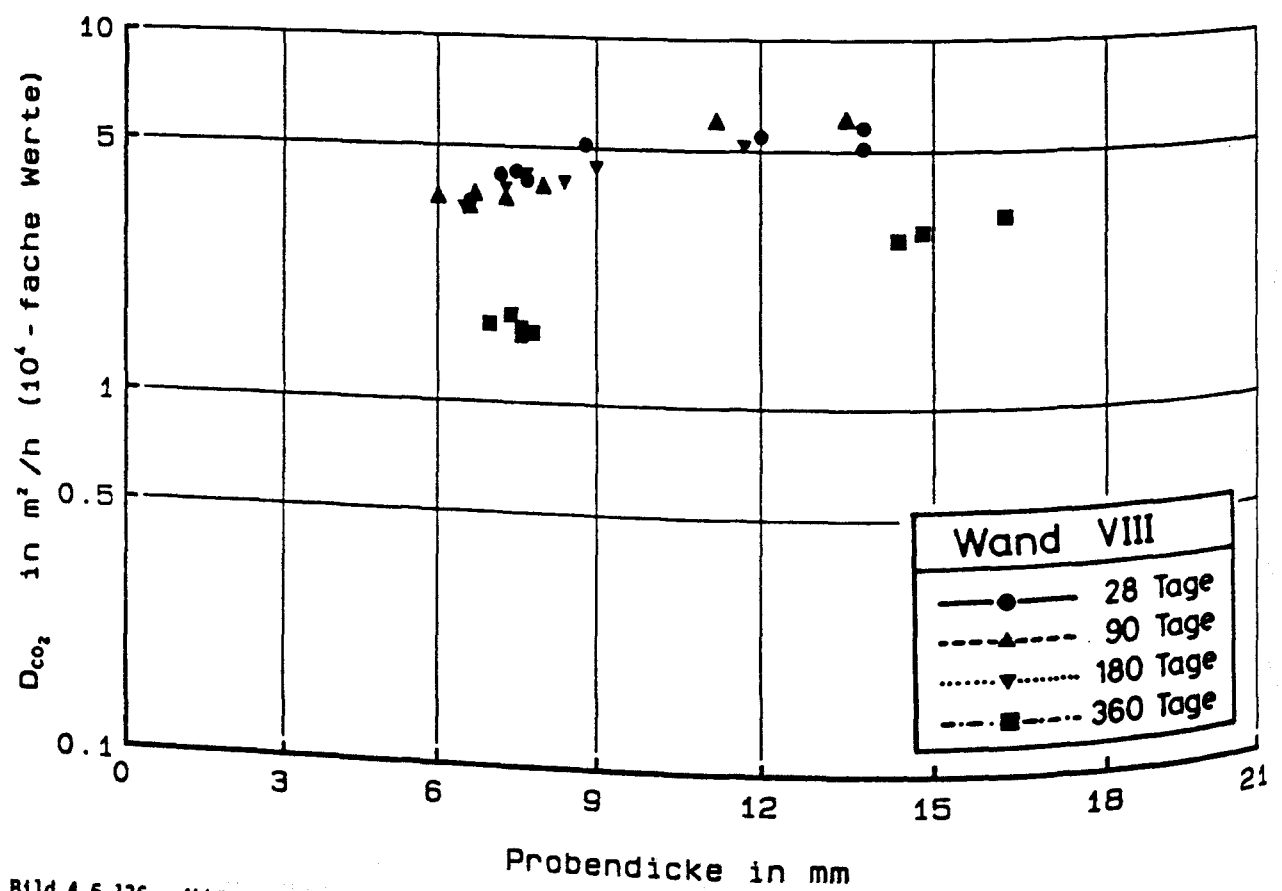


Bild 4.6.136 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand VIII, Wandmitte)

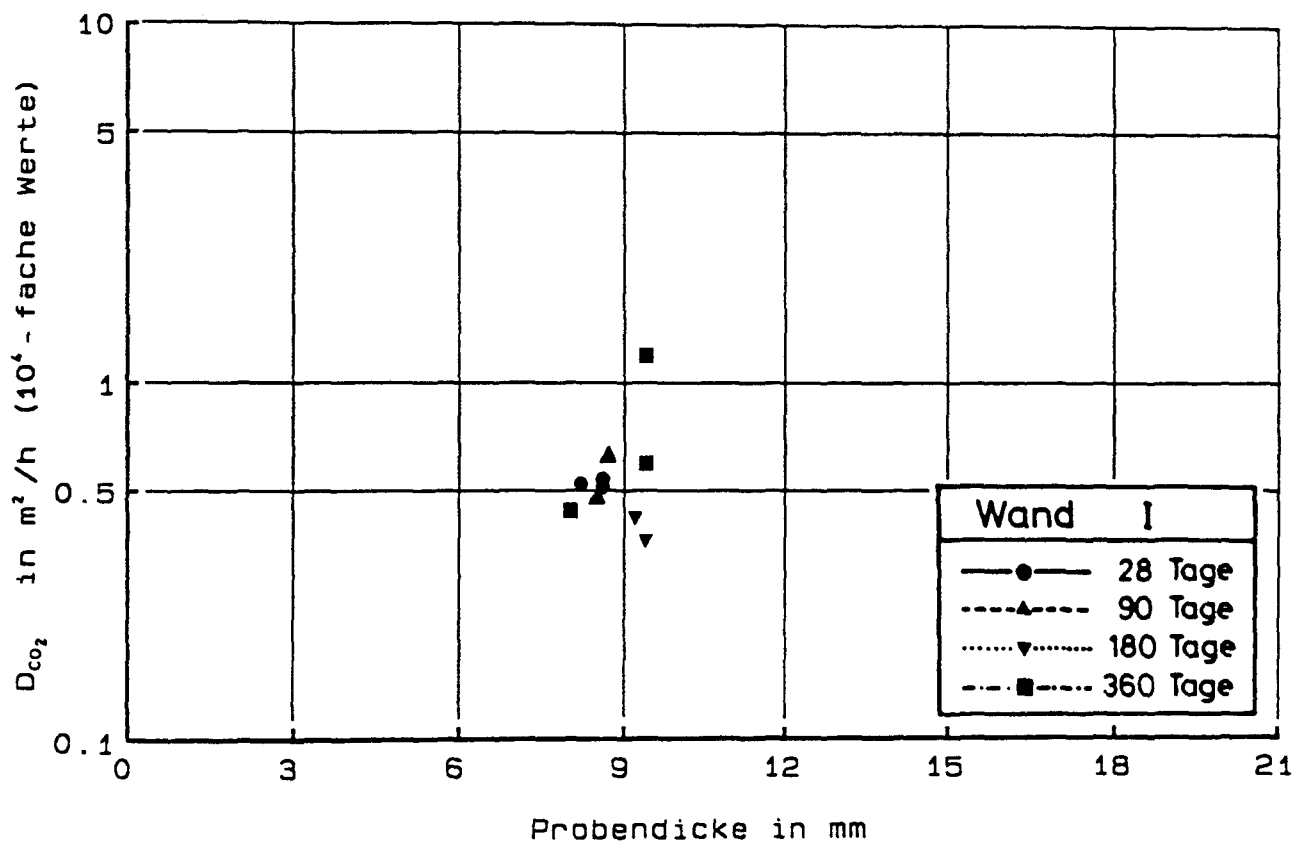


Bild 4.6.137 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand I, Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite)

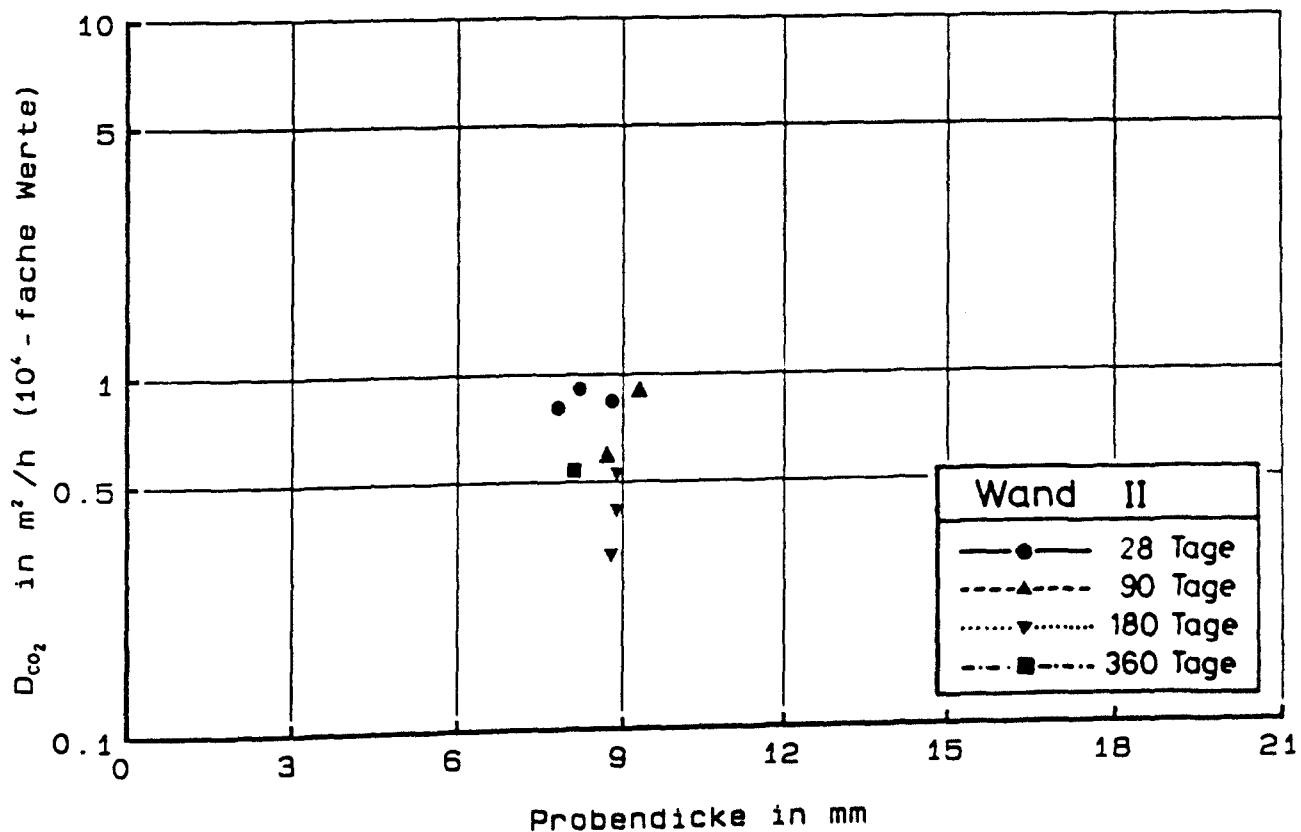


Bild 4.6.138 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand II, Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite)

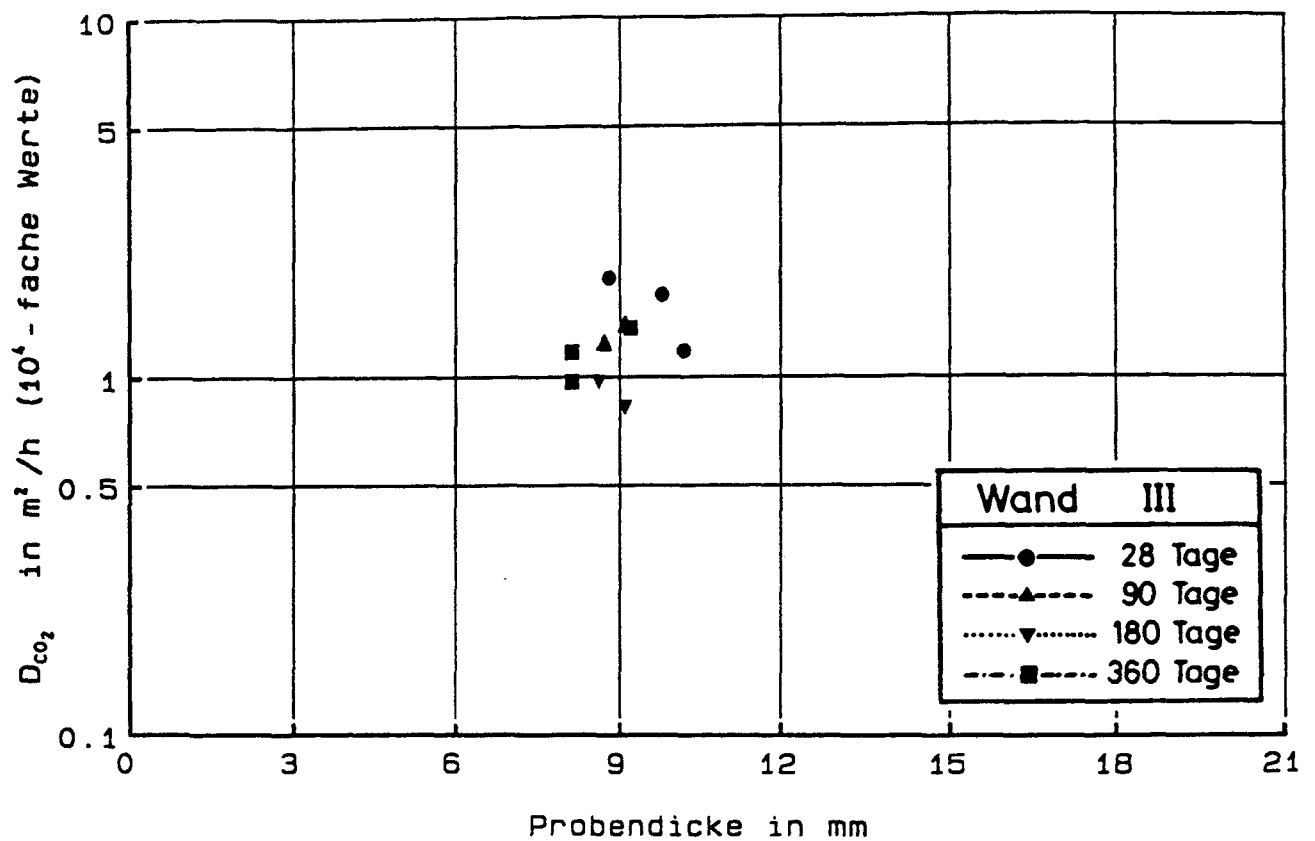


Bild 4.6.139 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand III, Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite)

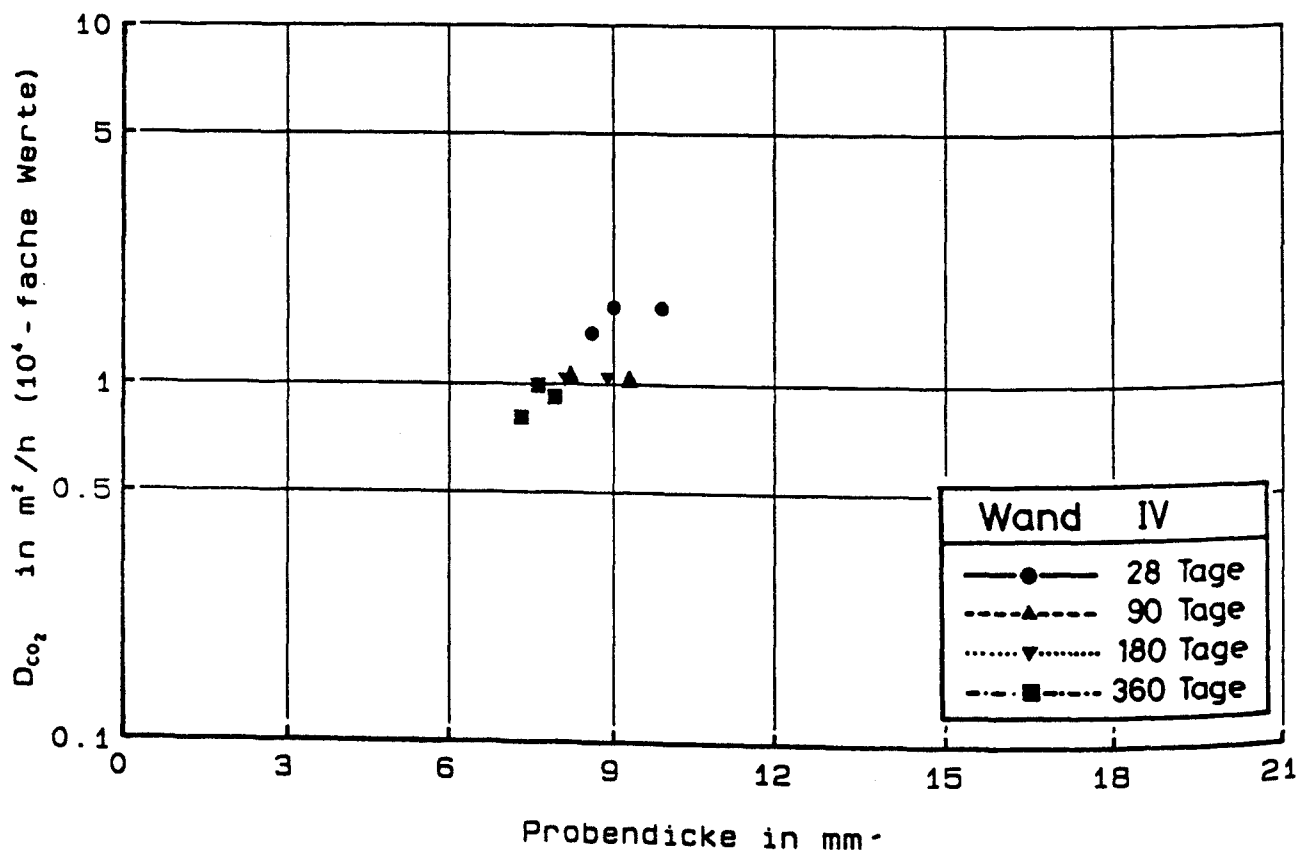


Bild 4.6.140 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand IV, Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite)

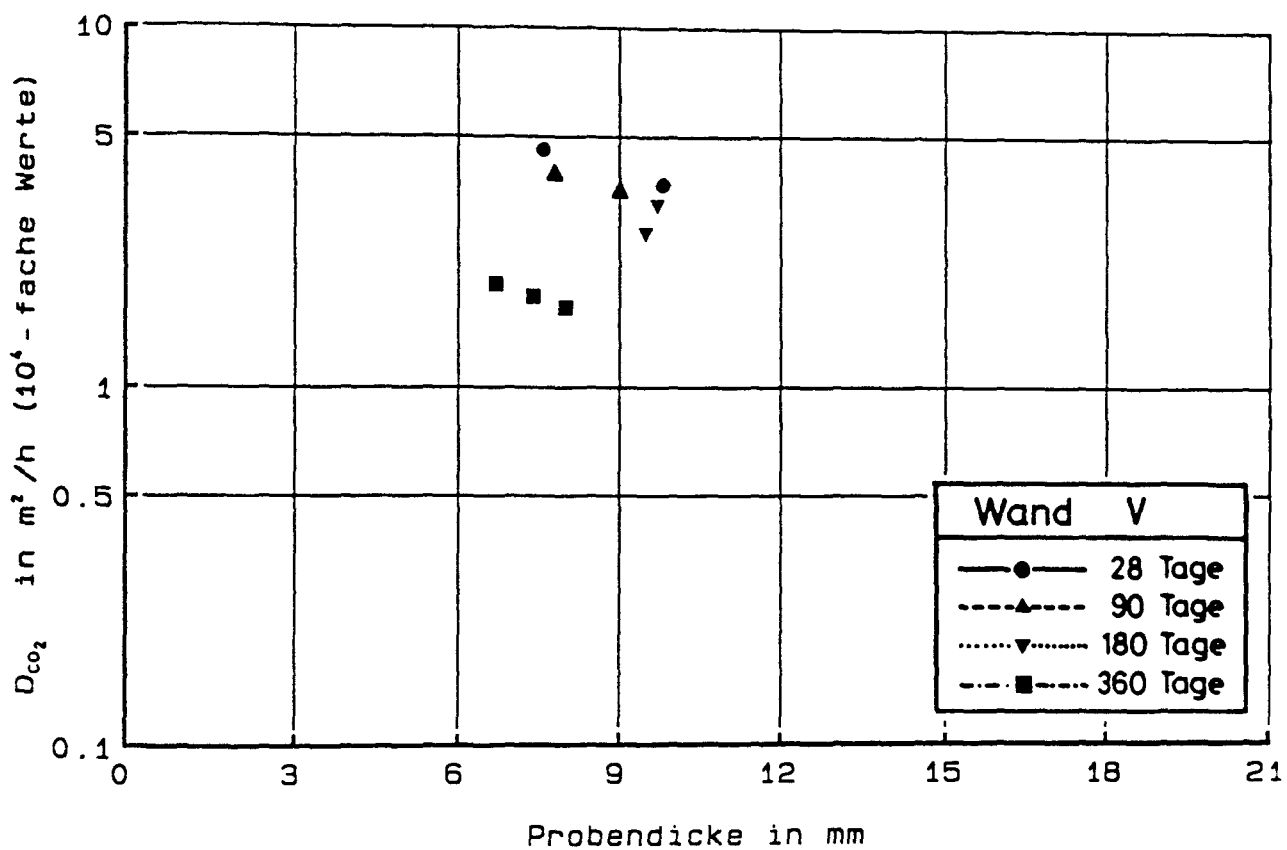


Bild 4.6.141 : Abhängigkeit des CO₂-Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand V, Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite)

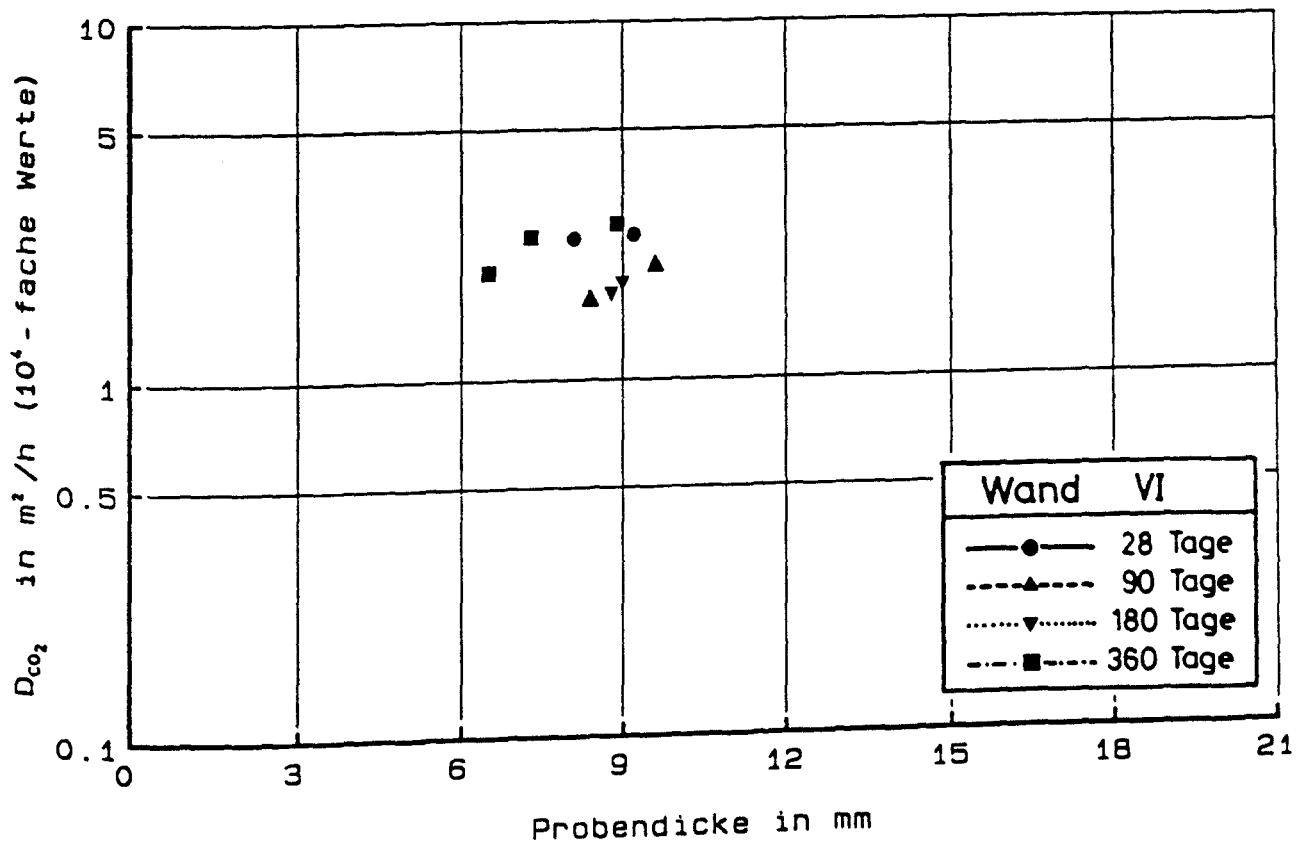


Bild 4.6.142 : Abhängigkeit des CO₂-Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand VI, Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite)

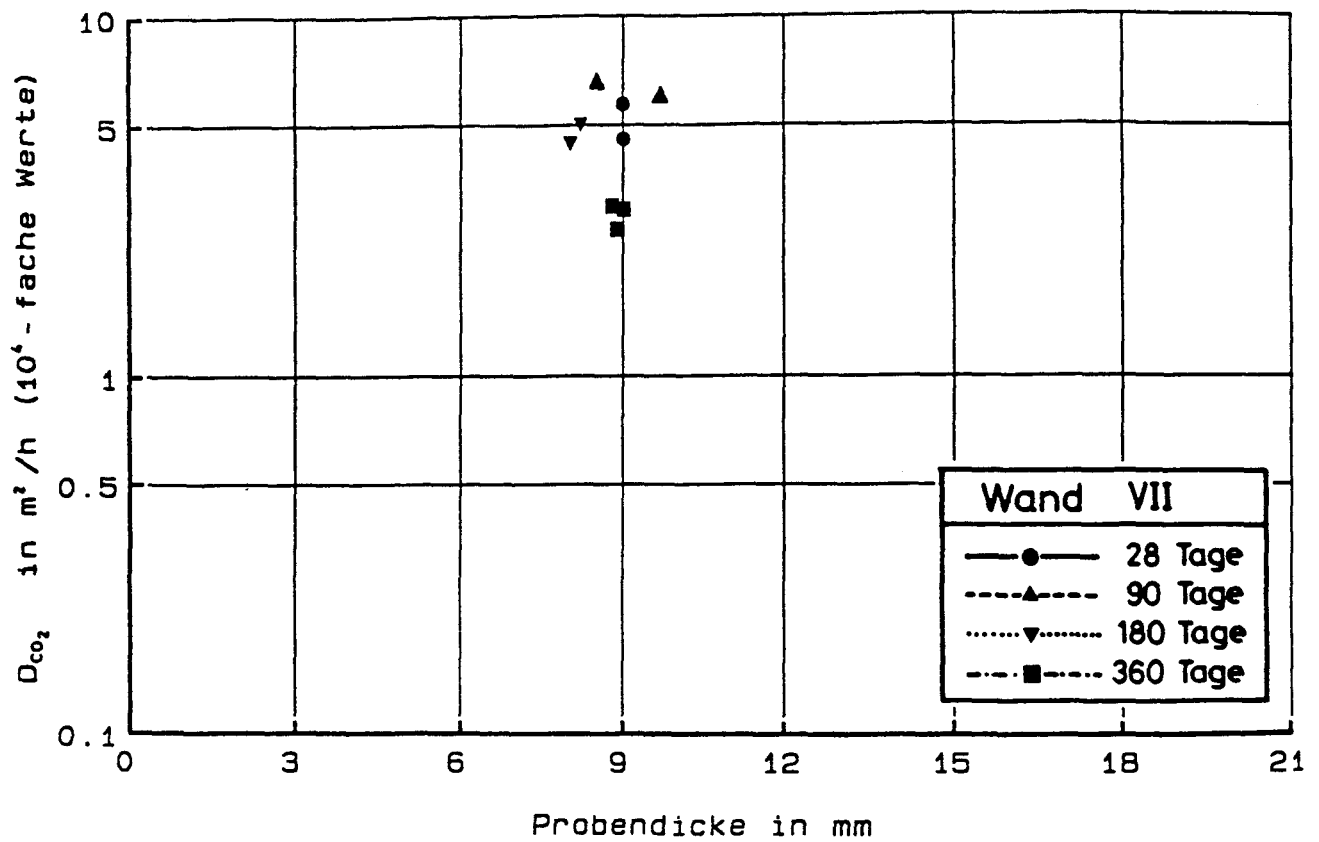


Bild 4.6.143 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand VII, Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite)

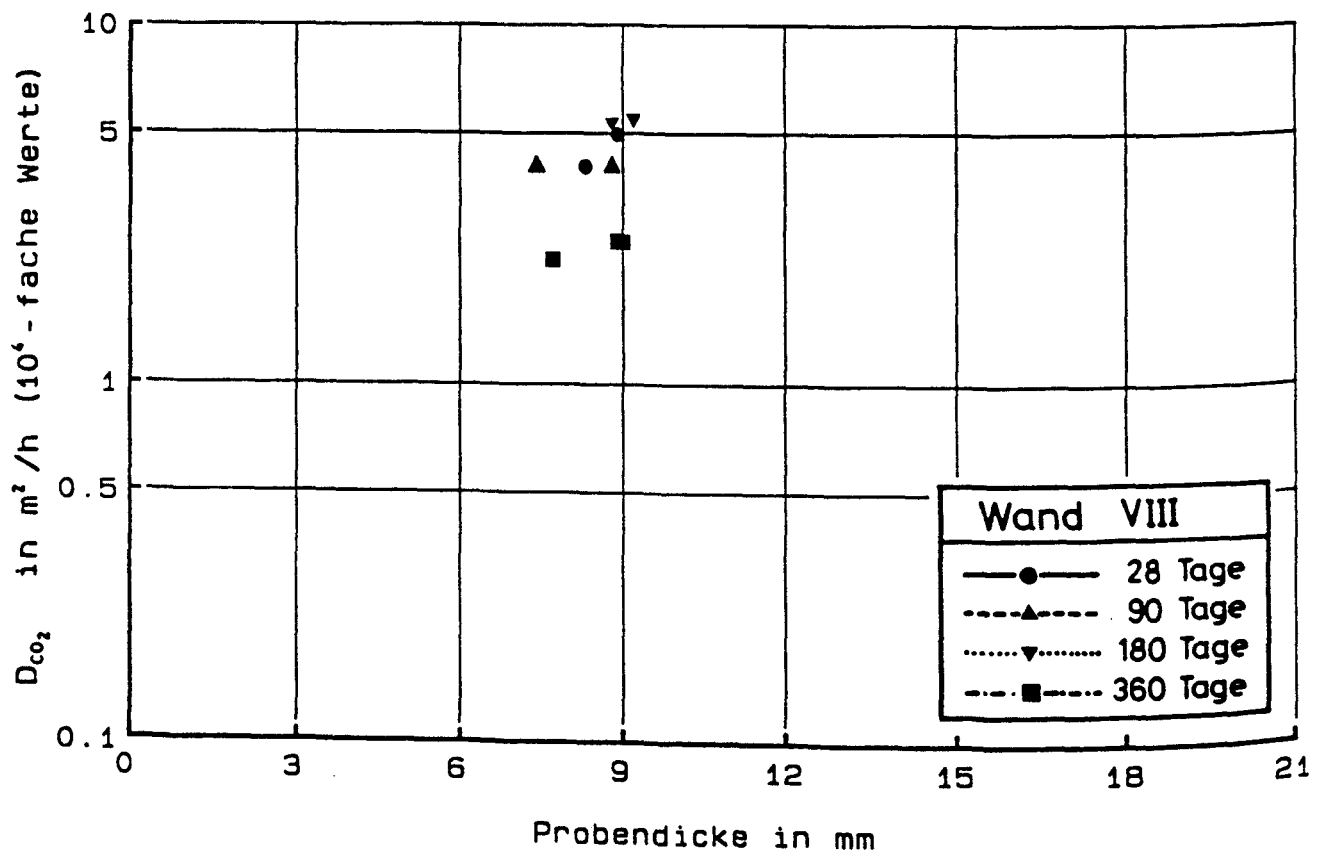


Bild 4.6.144 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z-Wert. (Wand VIII, Oberflächennaher Bereich der unbewehrten Wandseite)

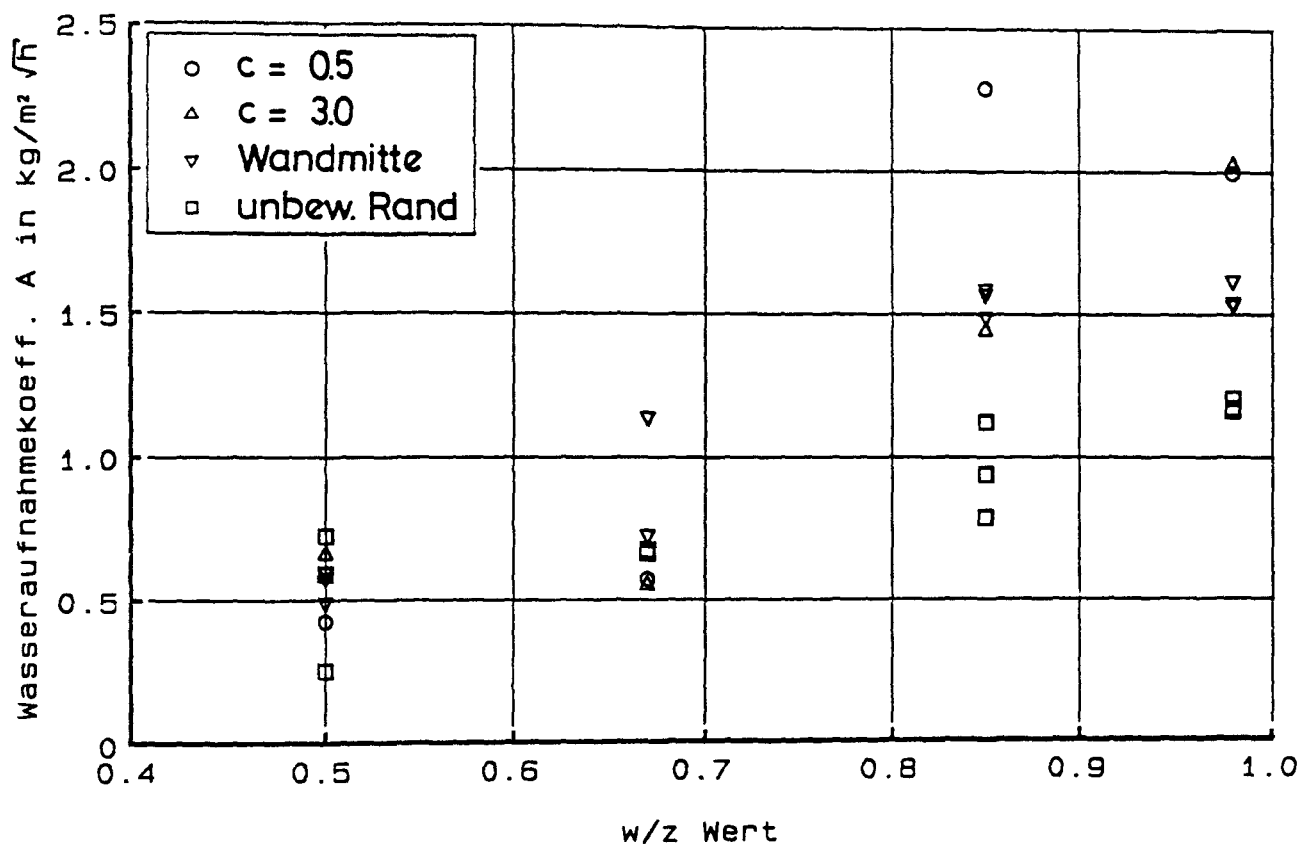


Bild 4.6.145 : Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten vom w/z-Wert. (Betonalter 28 Tage, nicht nachbehandelte Wände)

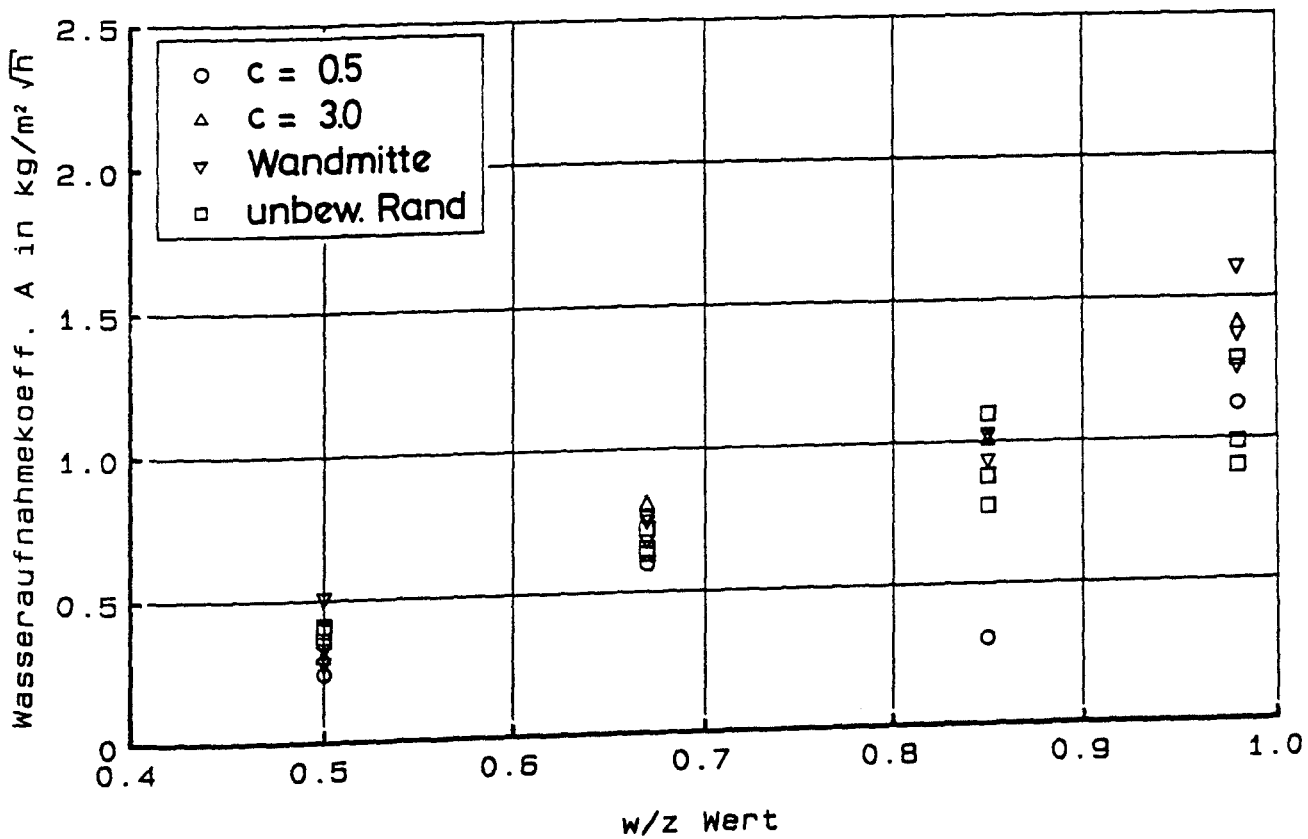


Bild 4.6.146 : Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten vom w/z-Wert. (Betonalter 28 Tage, nachbehandelte Wände)

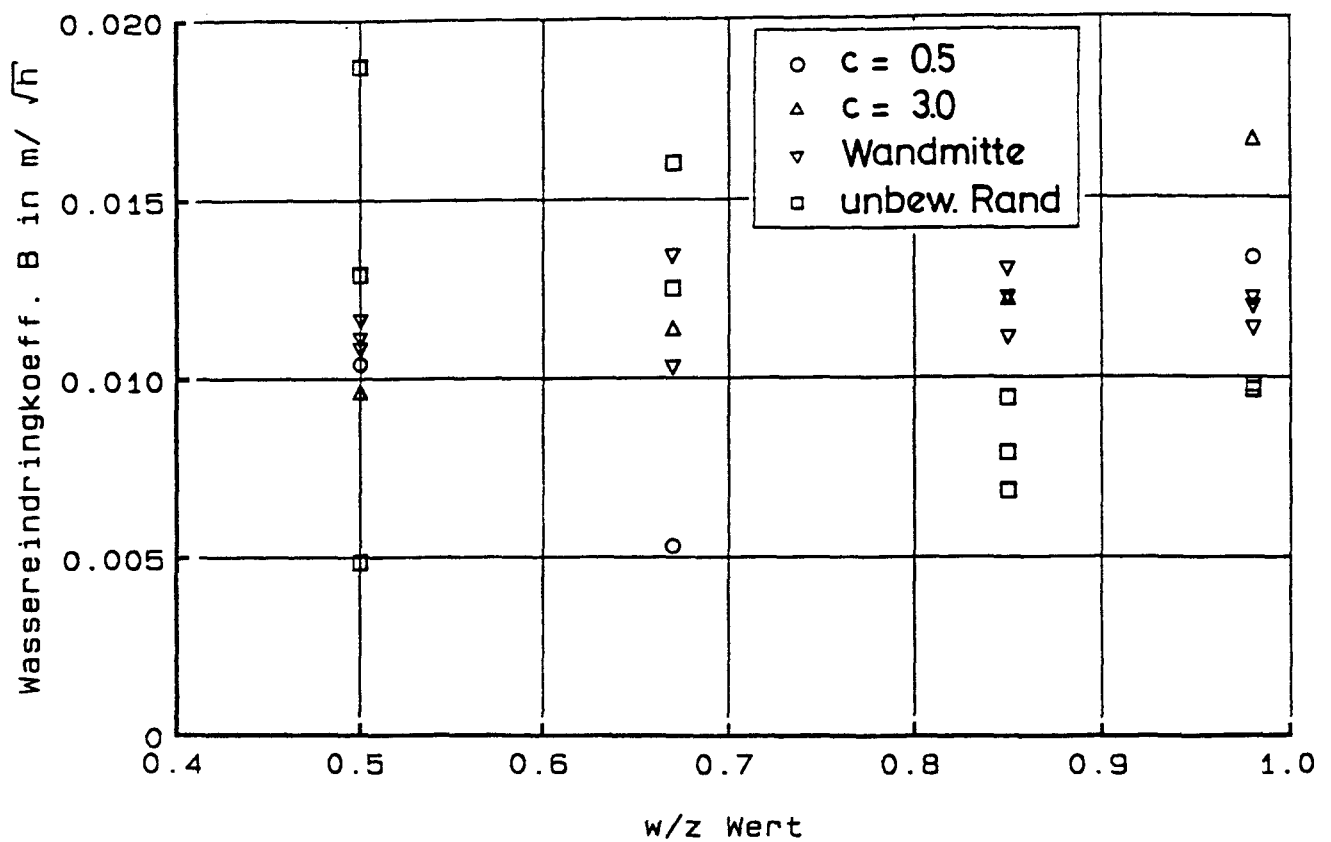


Bild 4.6.147 : Abhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten vom w/z-Wert. (Betonalter 28 Tage, nicht nachbehandelte Wände)

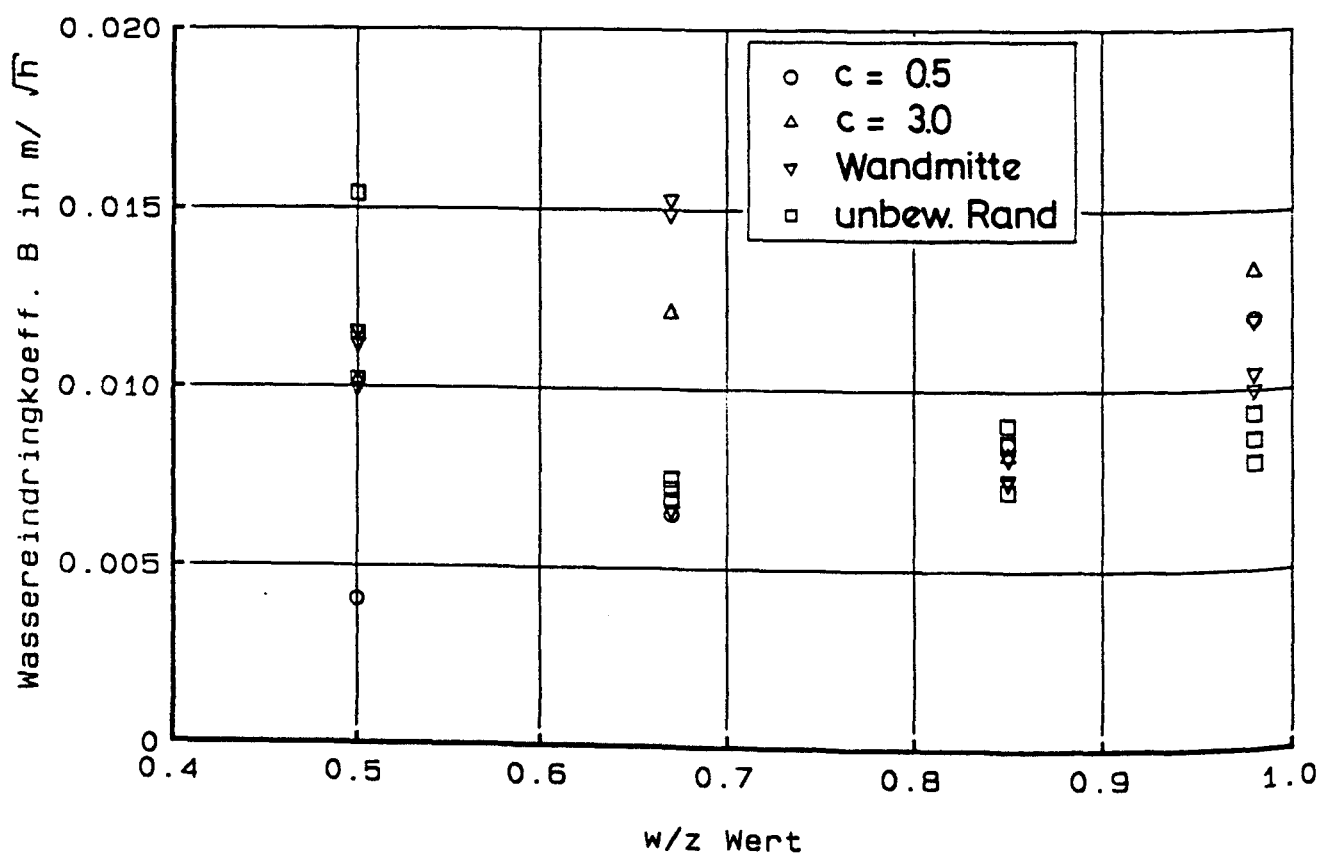


Bild 4.6.148 : Abhängigkeit des Wassereindringkoeffizienten vom w/z-Wert. (Betonalter 28 Tage, nachbehandelte Wände)

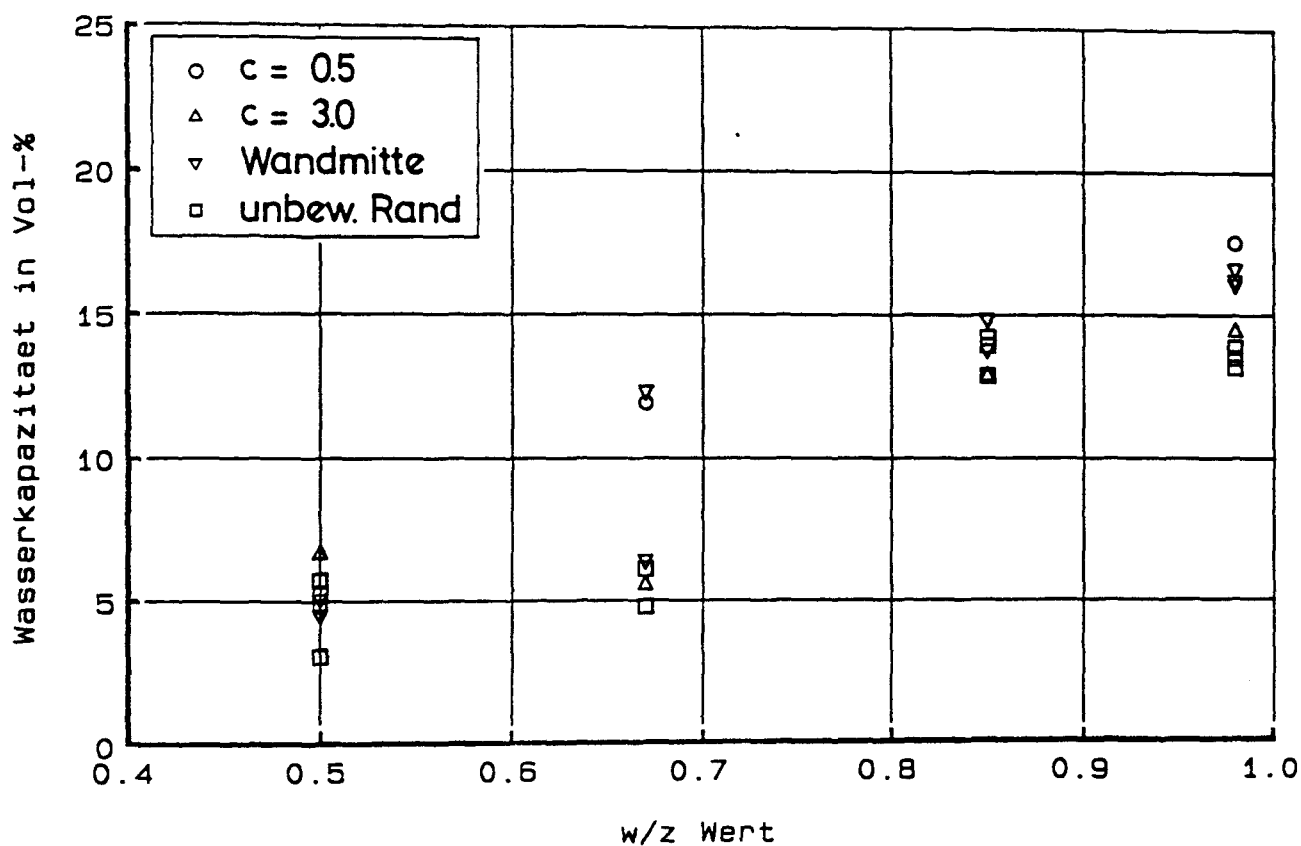


Bild 4.6.149 : Abhängigkeit der Wasserkapazität vom w/z-Wert. (Betonalter 28 Tage, nicht nachbehandelte Wände)

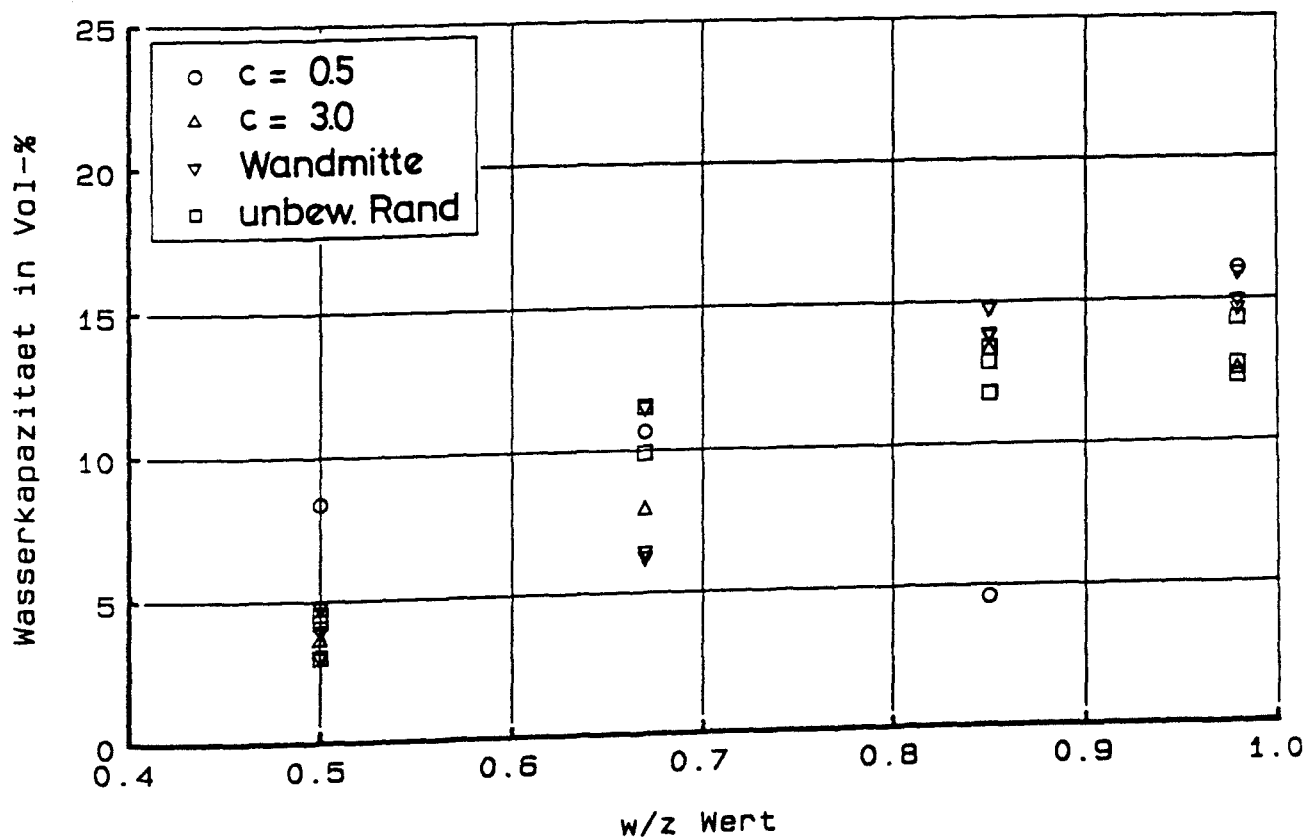


Bild 4.6.150 : Abhängigkeit der Wasserkapazität vom w/z-Wert. (Betonalter 28 Tage, nachbehandelte Wände)

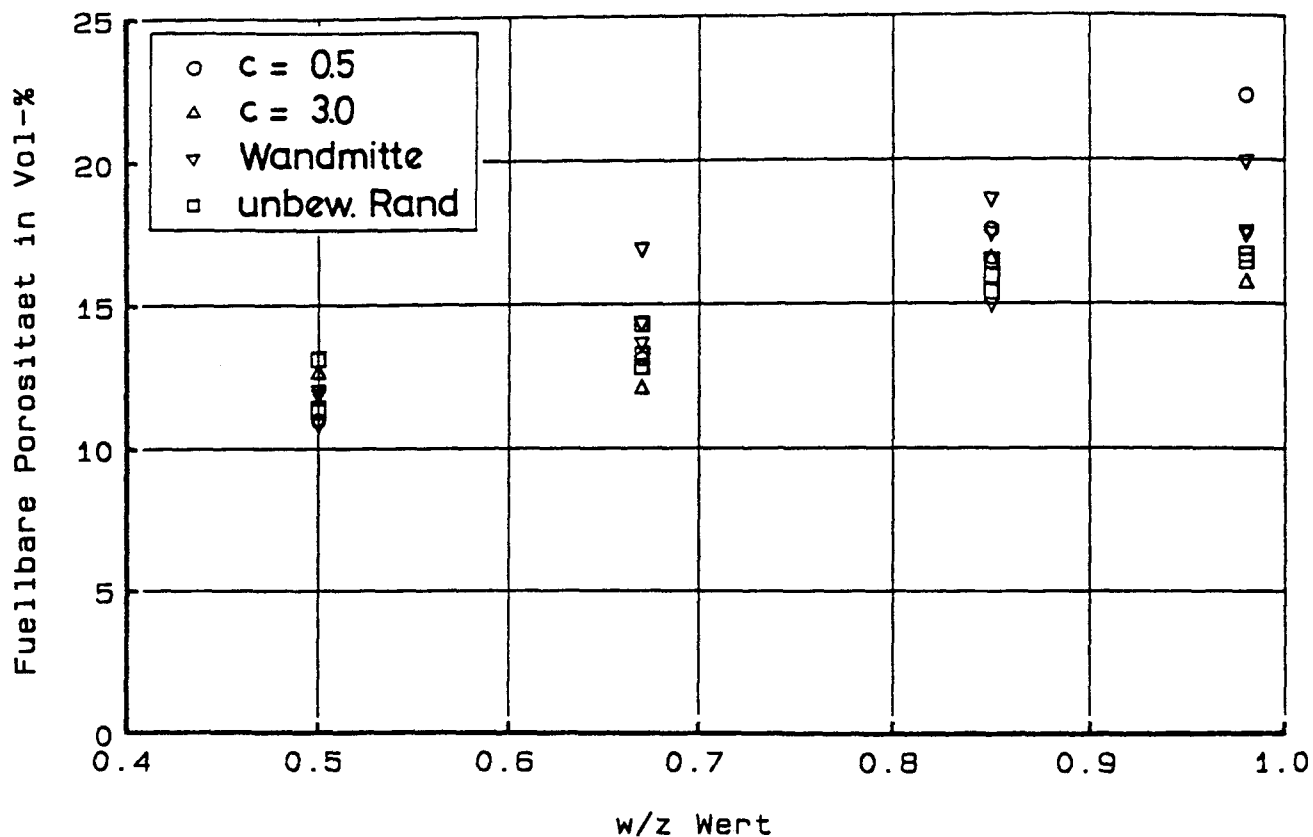


Bild 4.6.151 : Abhängigkeit der füllbaren Porosität vom w/z-Wert. (Betonalter 28 Tage, nicht nachbehandelte Wände)

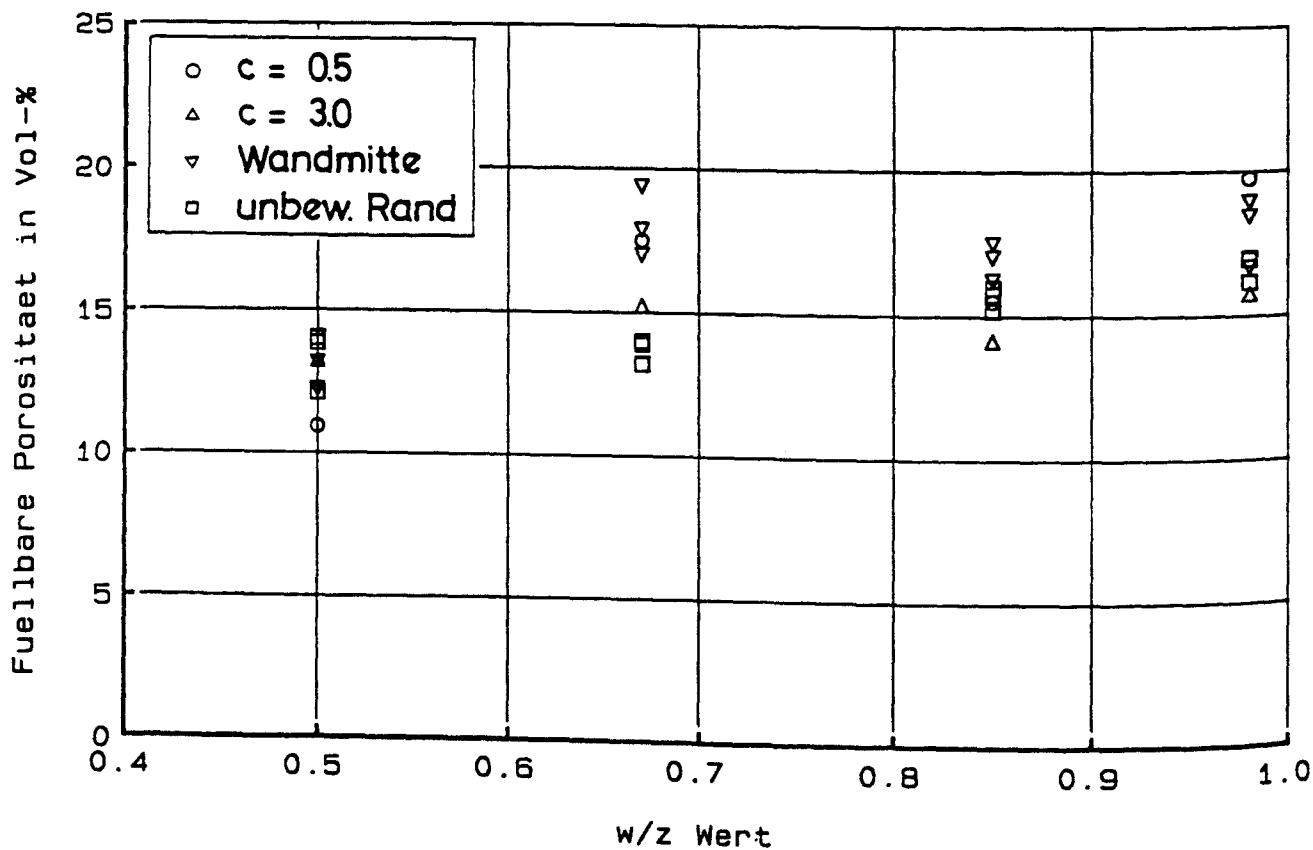


Bild 4.6.152 : Abhängigkeit der füllbaren Porosität vom w/z-Wert. (Betonalter 28 Tage, nachbehandelte Wände)

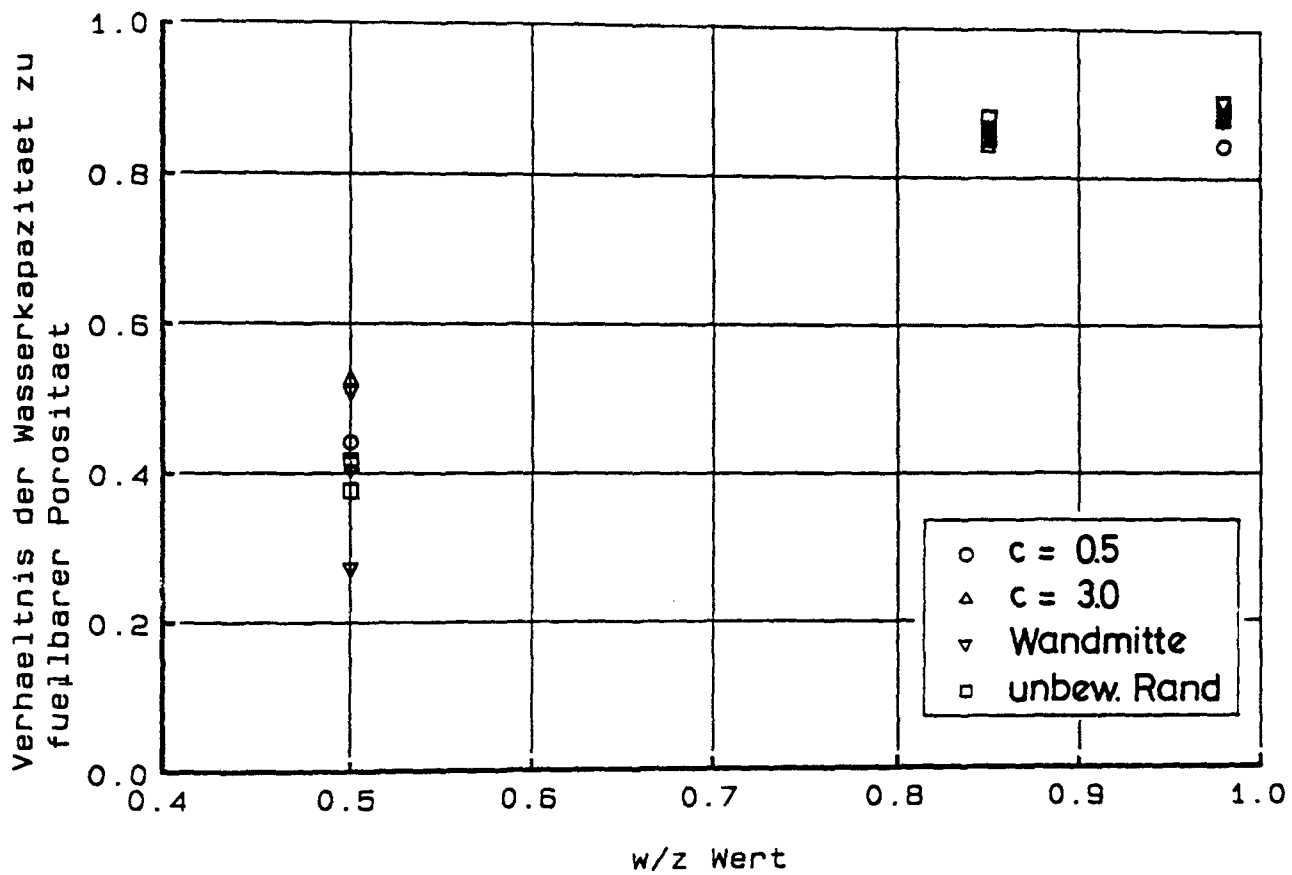


Bild 4.6.153a : Abhängigkeit des Verhältnisses Wasserkapazität zu füllbaren Porosität vom w/z-Wert.
(Betonalter 28 Tage, nicht nachbehandelte Wände)

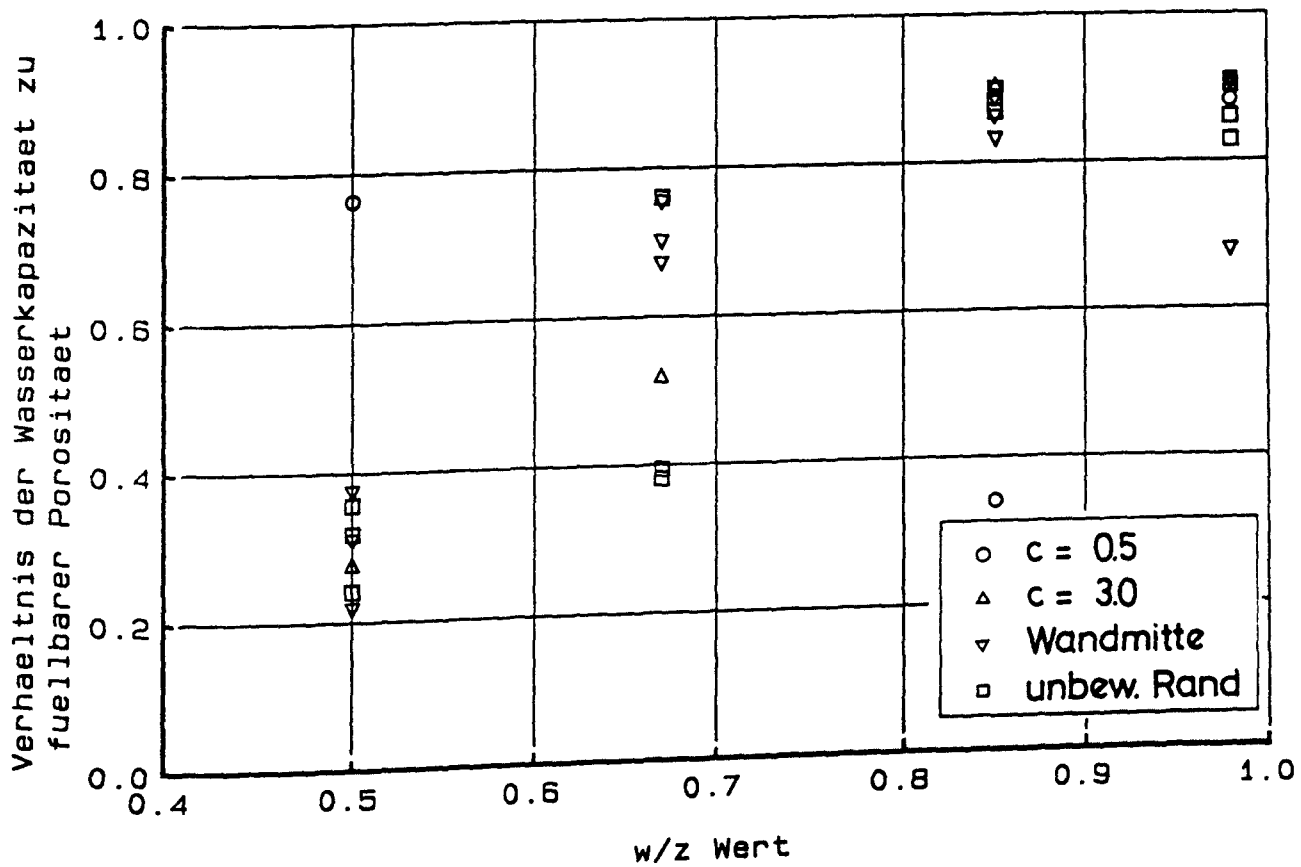


Bild 4.6.153b : Abhängigkeit des Verhältnisses Wasserkapazität zu füllbaren Porosität vom w/z-Wert.
(Betonalter 28 Tage, nachbehandelte Wände)

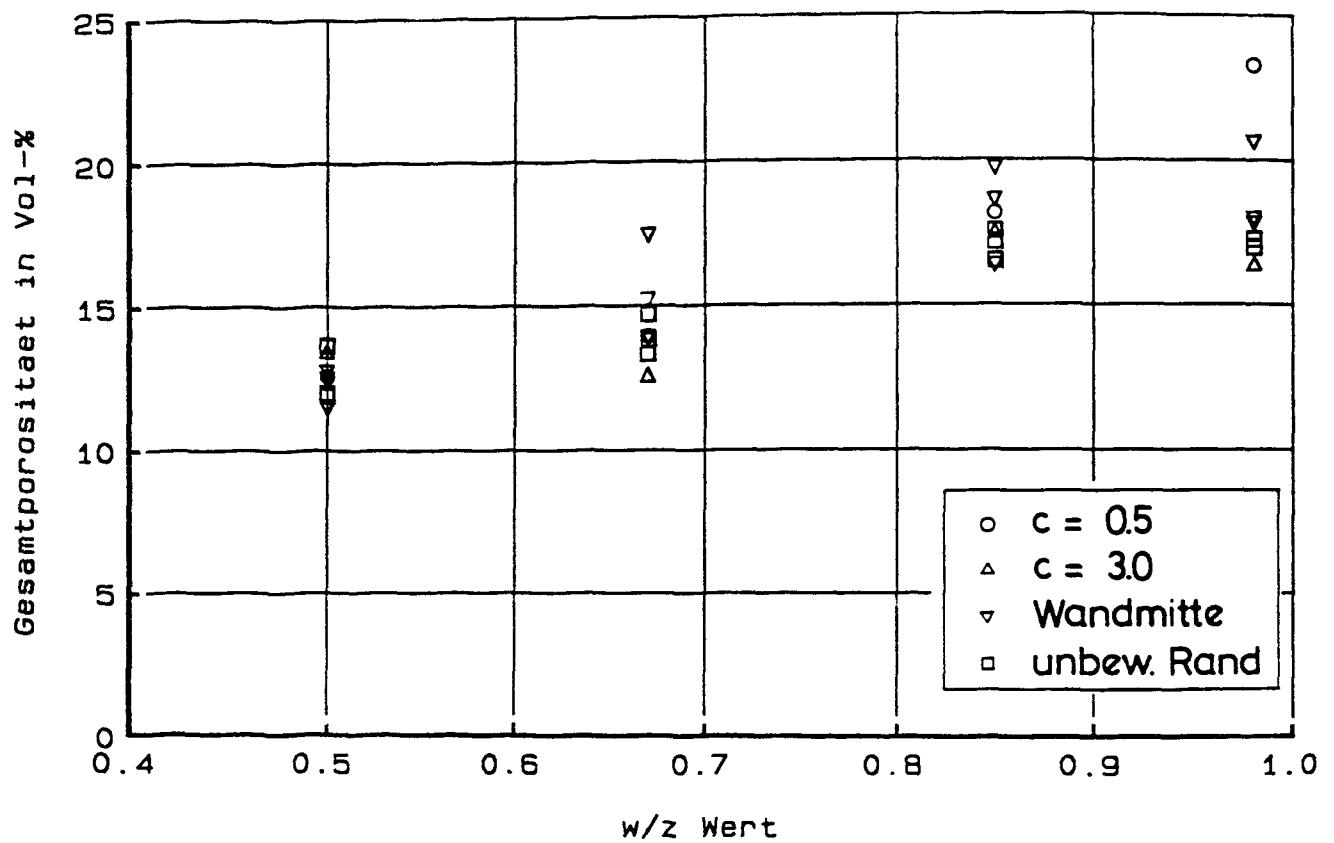


Bild 4.6.154 : Abhängigkeit der Gesamtporosität vom w/z-Wert. (Betonalter 28 Tage, nicht nachbehandelte Wände)

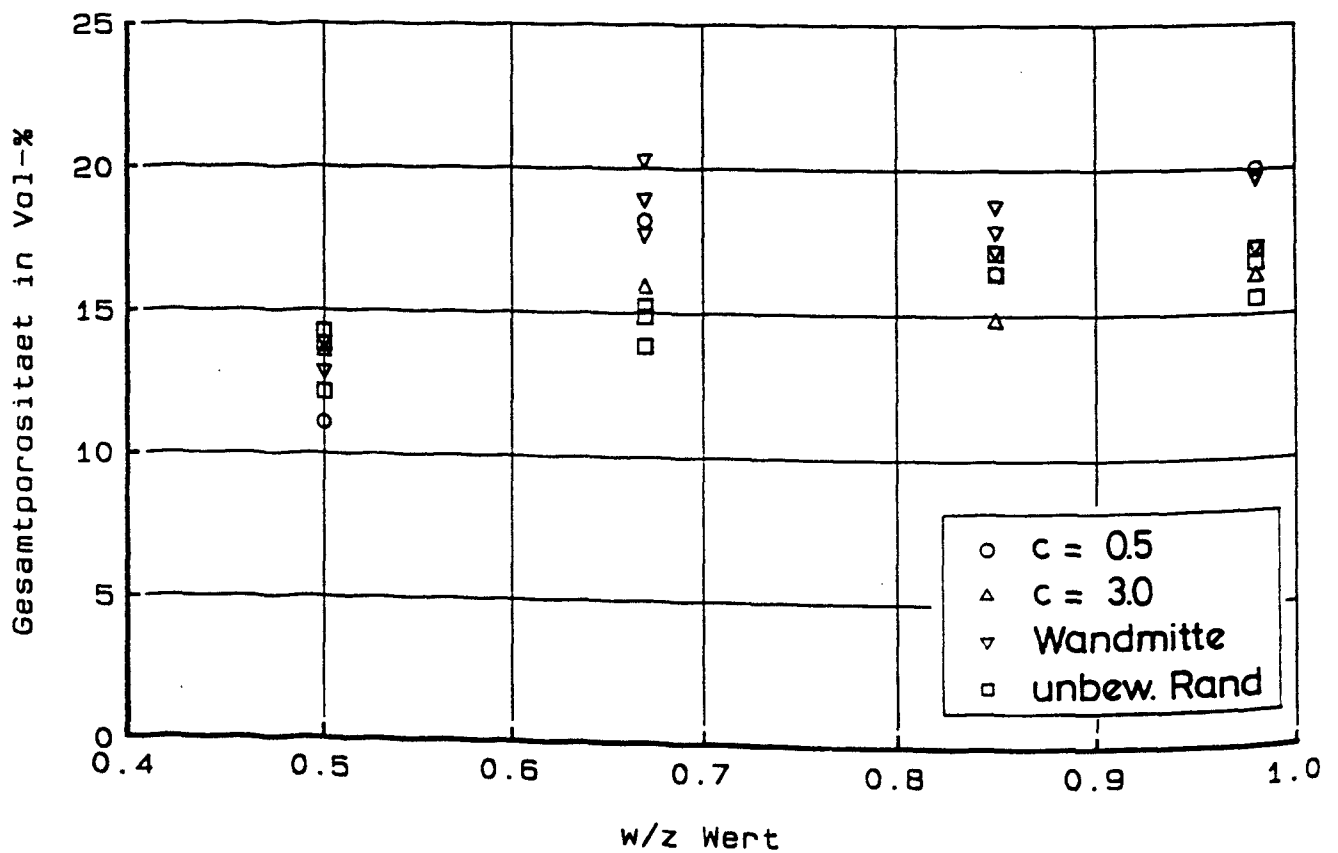


Bild 4.6.155 : Abhängigkeit der Gesamtporosität vom w/z-Wert. (Betonalter 28 Tage, nachbehandelte Wände)

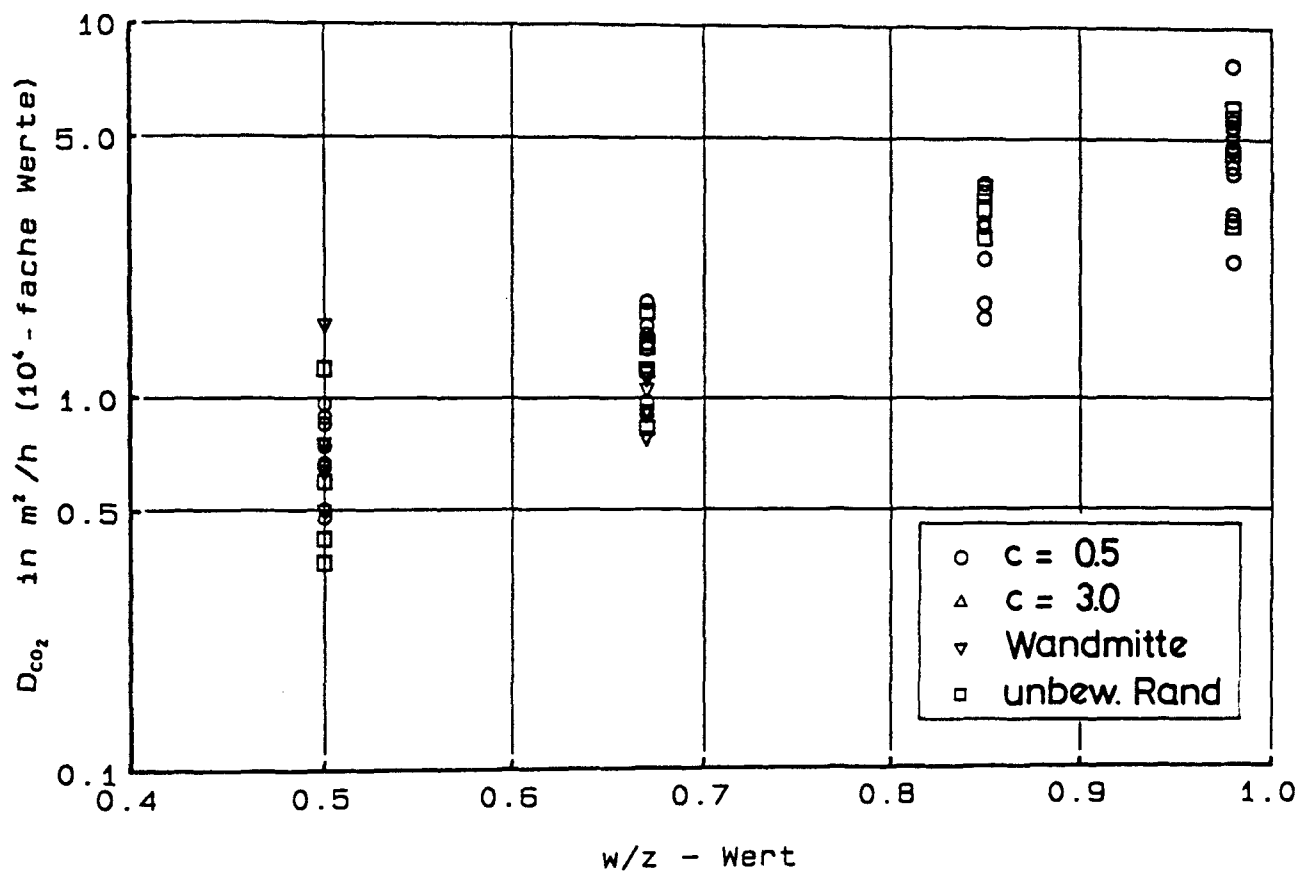


Bild 4.6.156 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z -Wert. (Proben aller Altersstufen mit einer Dicke von 9-11 mm; nicht nachbehandelte Wände)

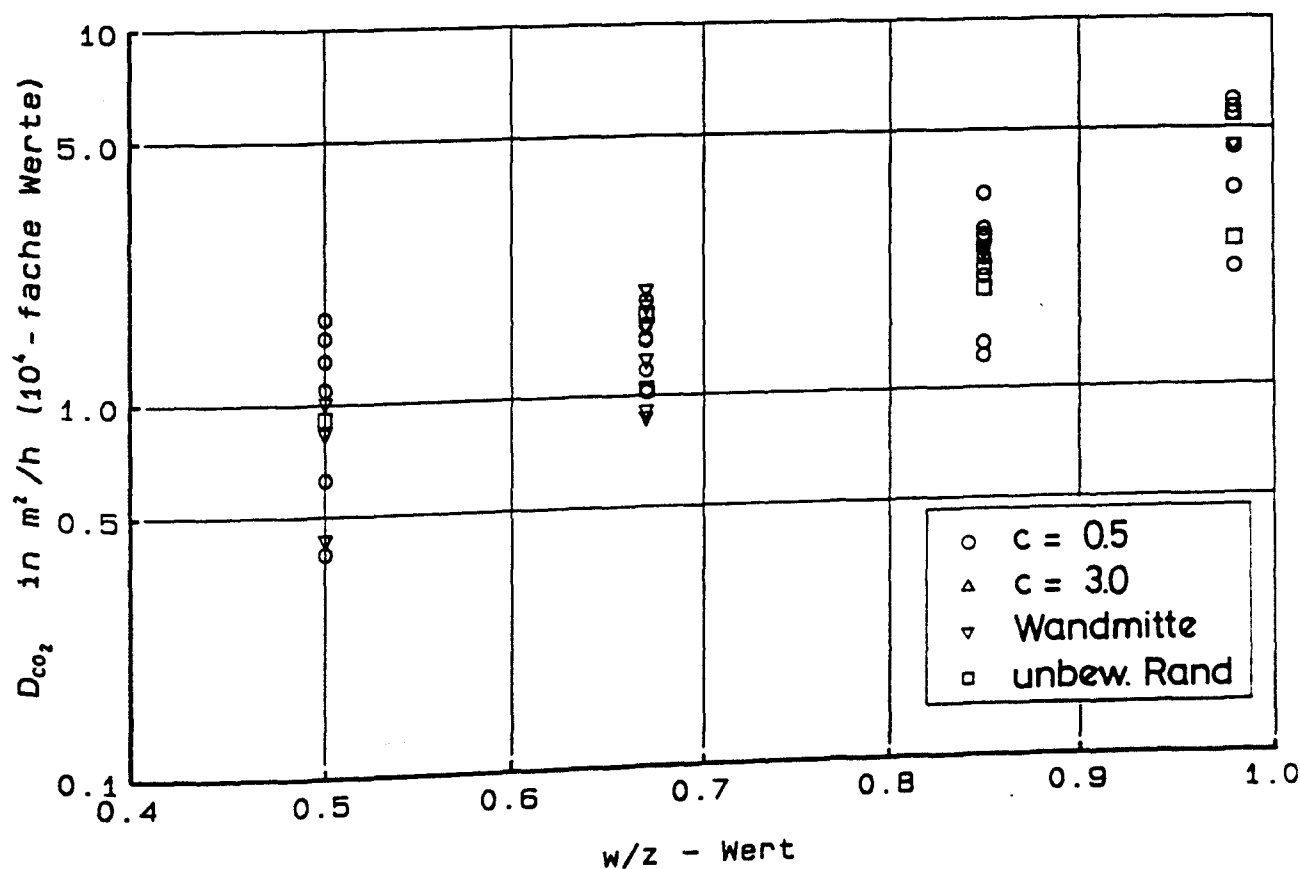


Bild 4.6.157 : Abhängigkeit des CO_2 -Diffusionskoeffizienten vom w/z -Wert. (Proben aller Altersstufen mit einer Dicke von 9-11 mm; nachbehandelte Wände)

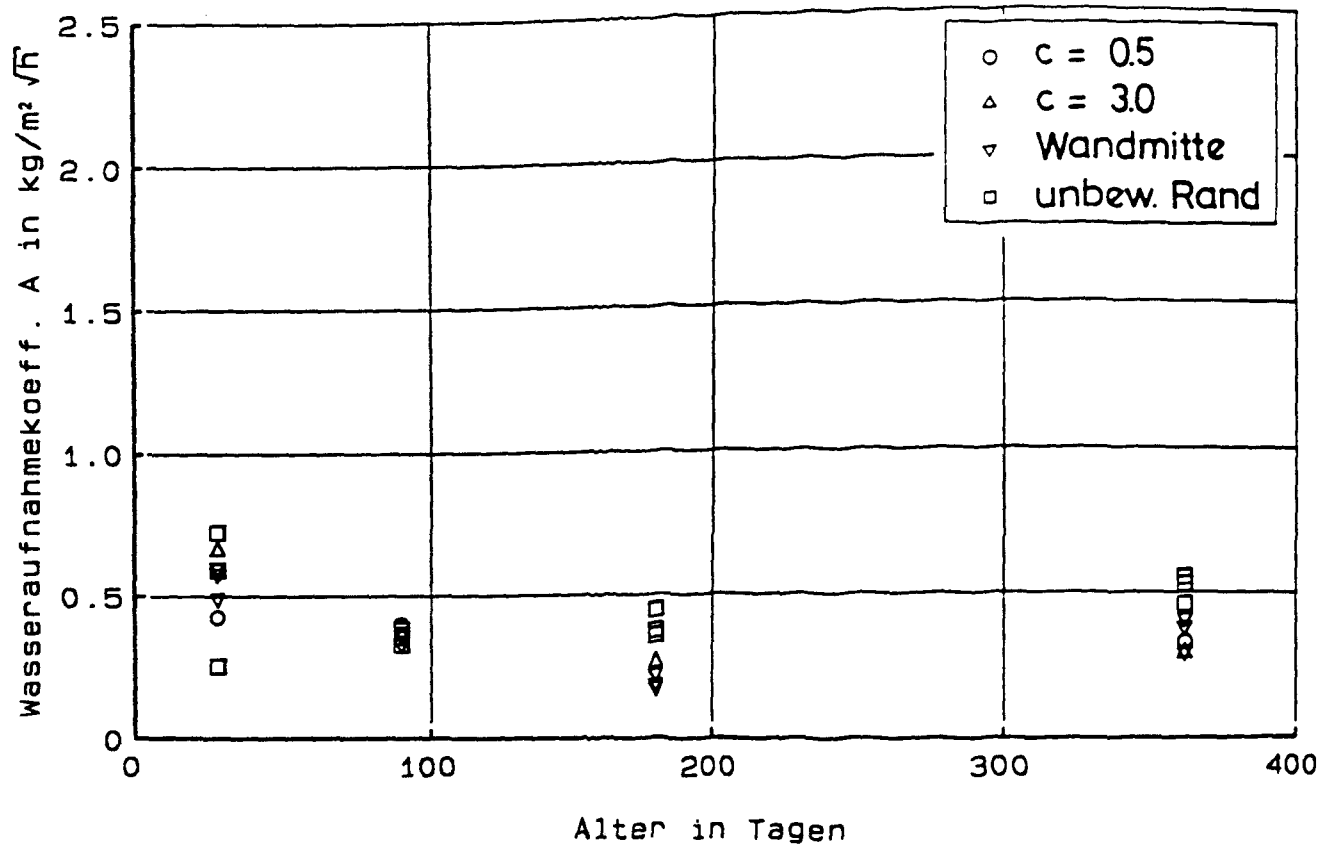


Bild 4.6.158 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand I. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

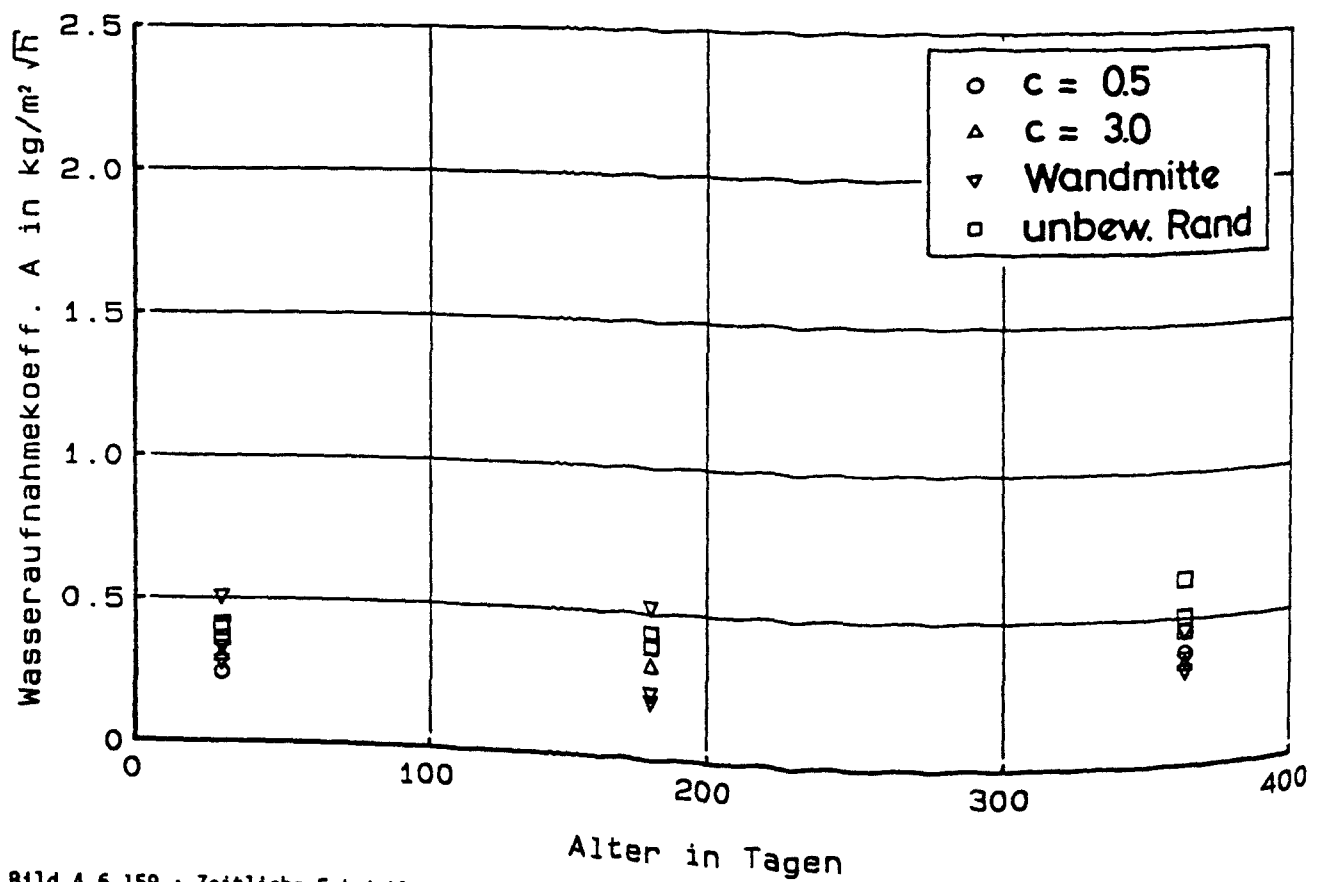


Bild 4.6.159 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand II. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

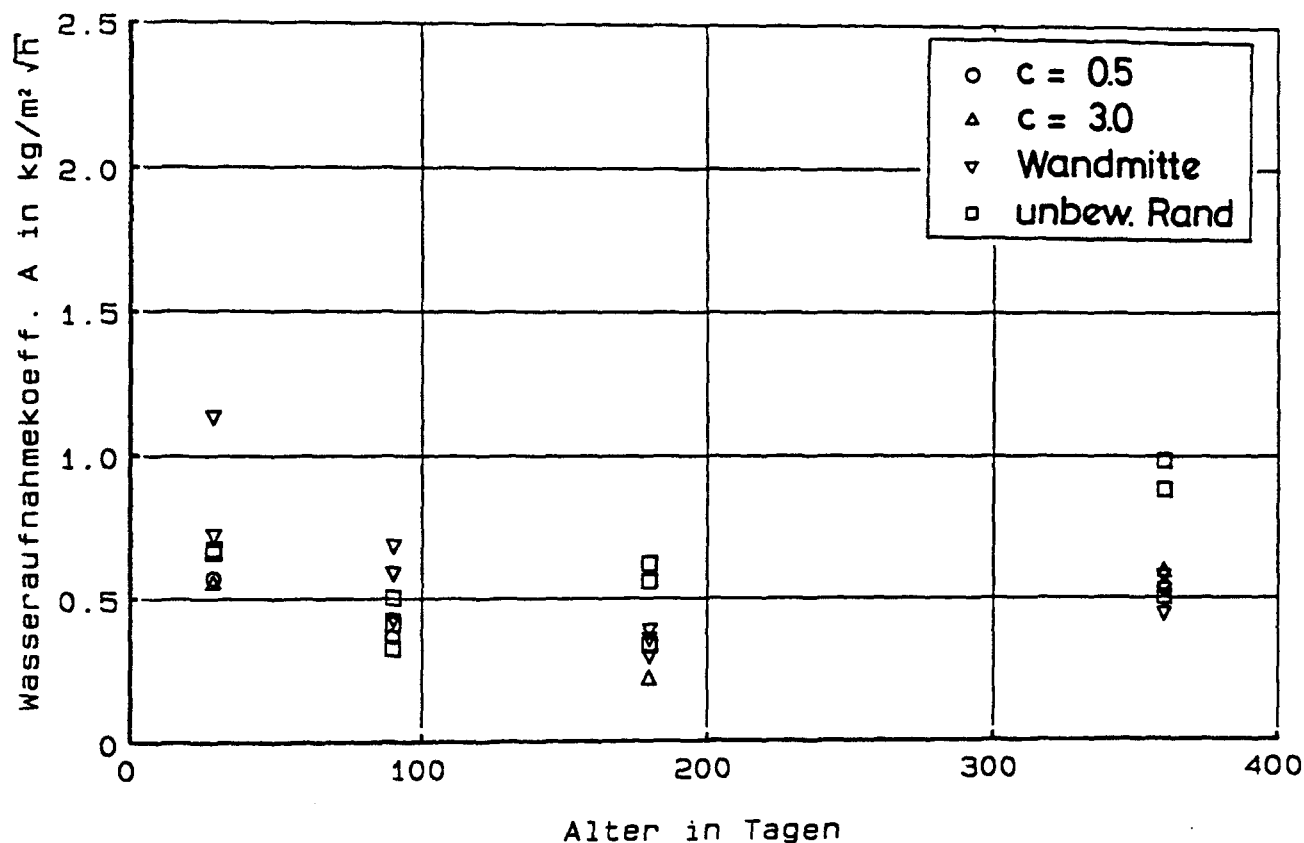


Bild 4.6.160 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand III. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

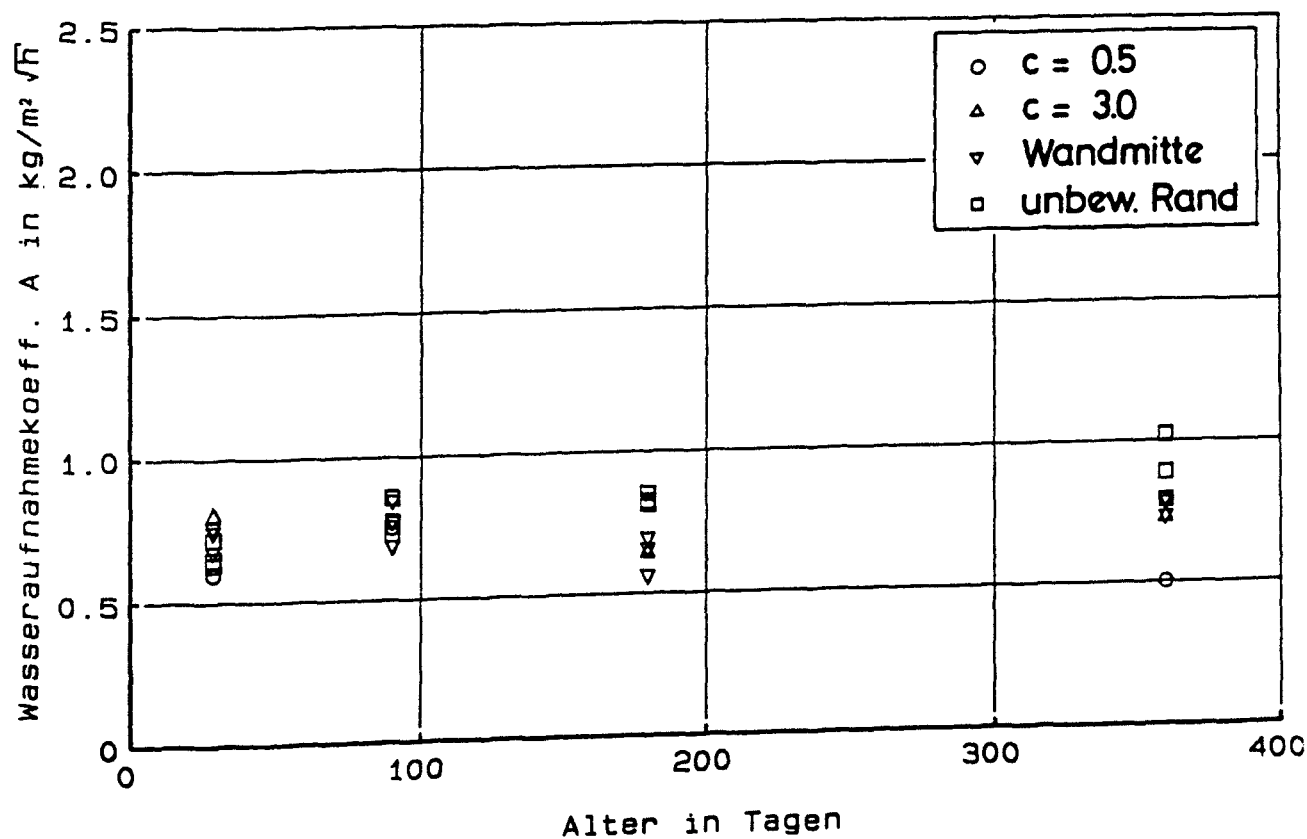


Bild 4.6.161 : Zeitliche Entwicklung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Wand IV. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

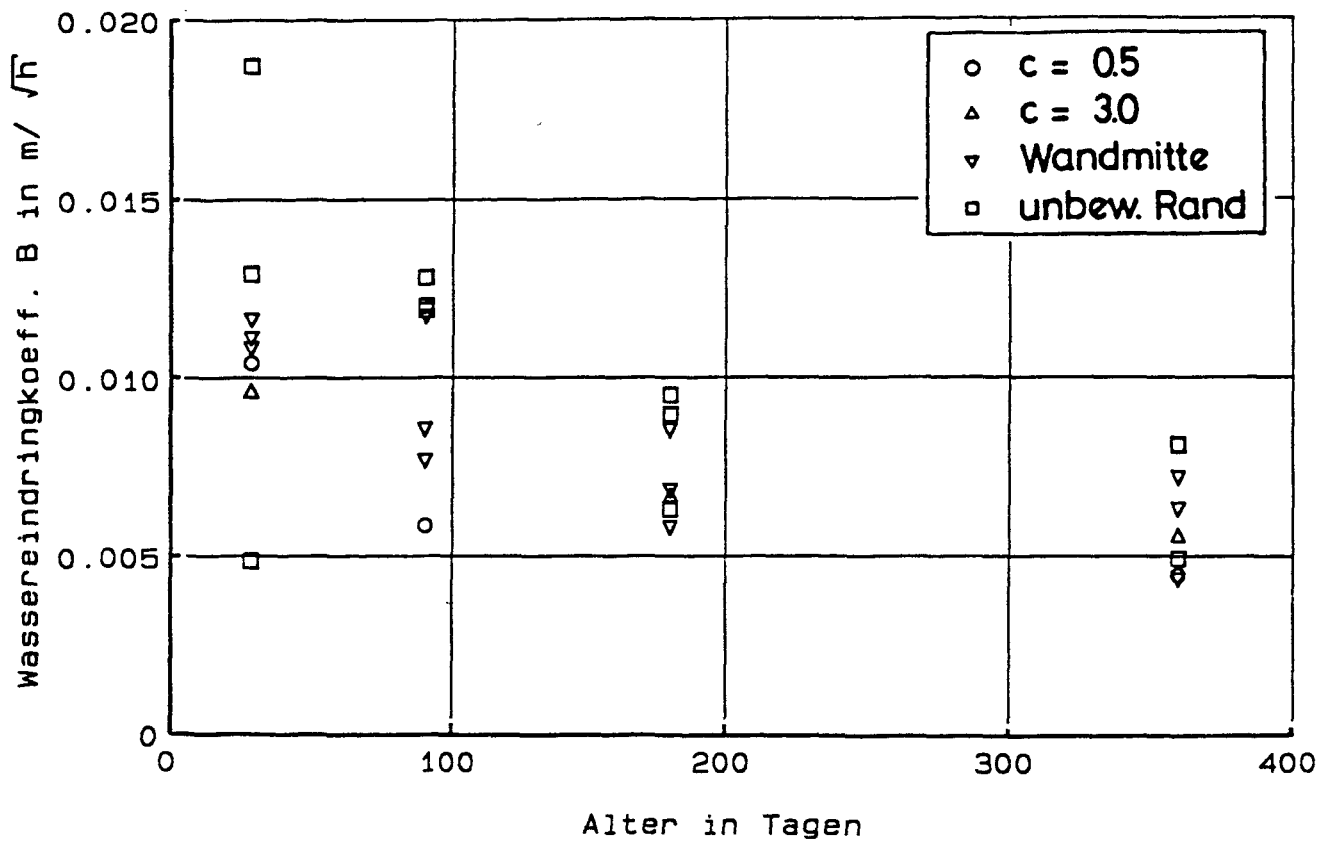


Bild 4.6.162 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand I. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

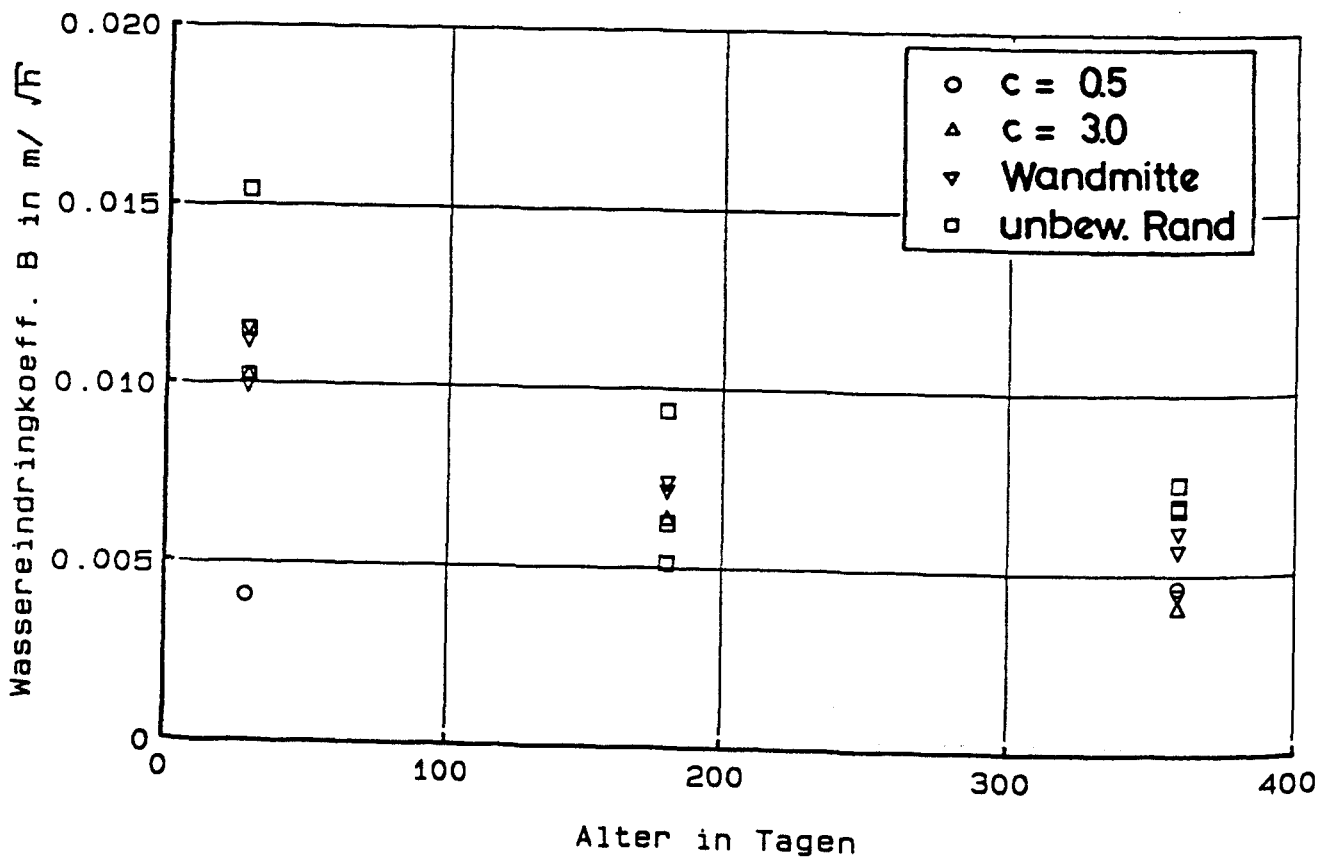


Bild 4.6.163 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand II. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

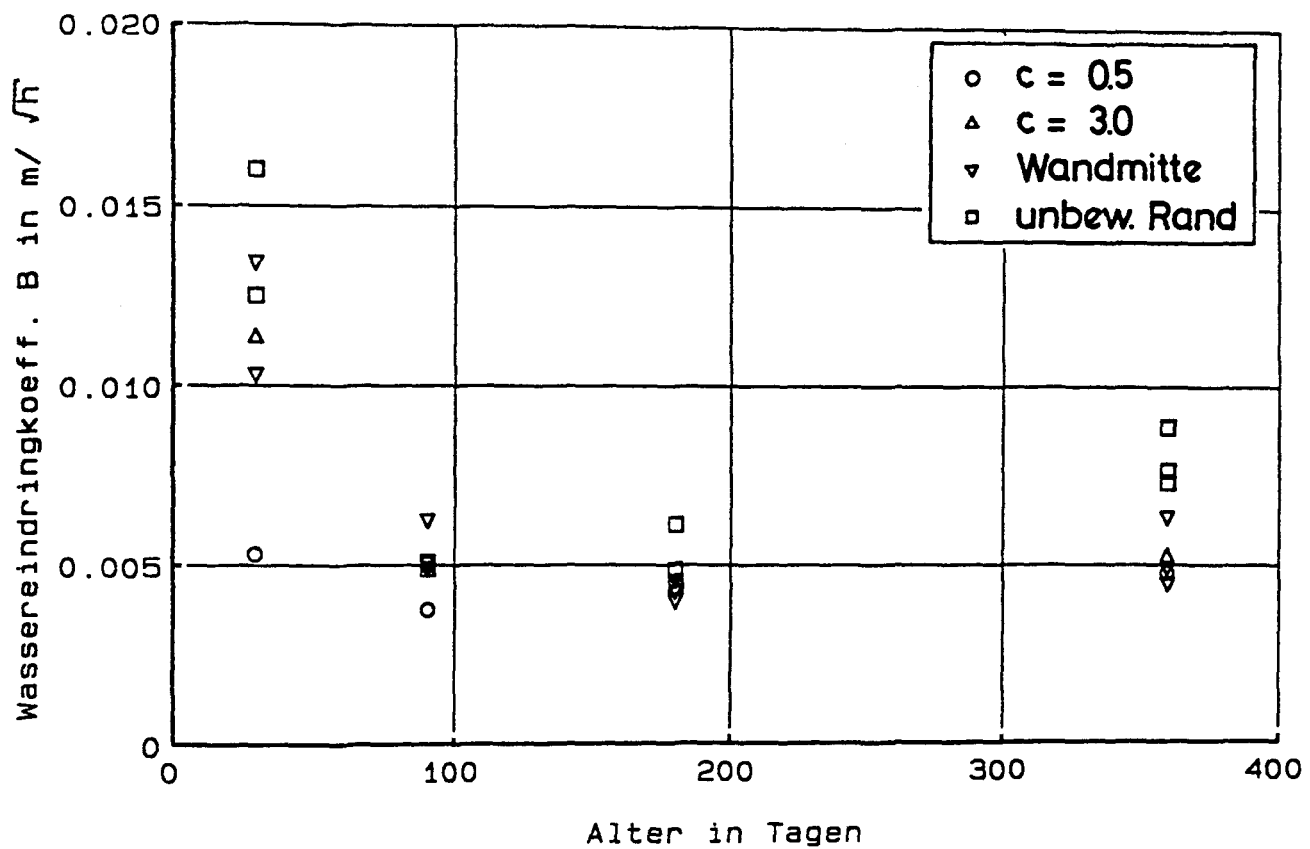


Bild 4.6.164 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand III. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

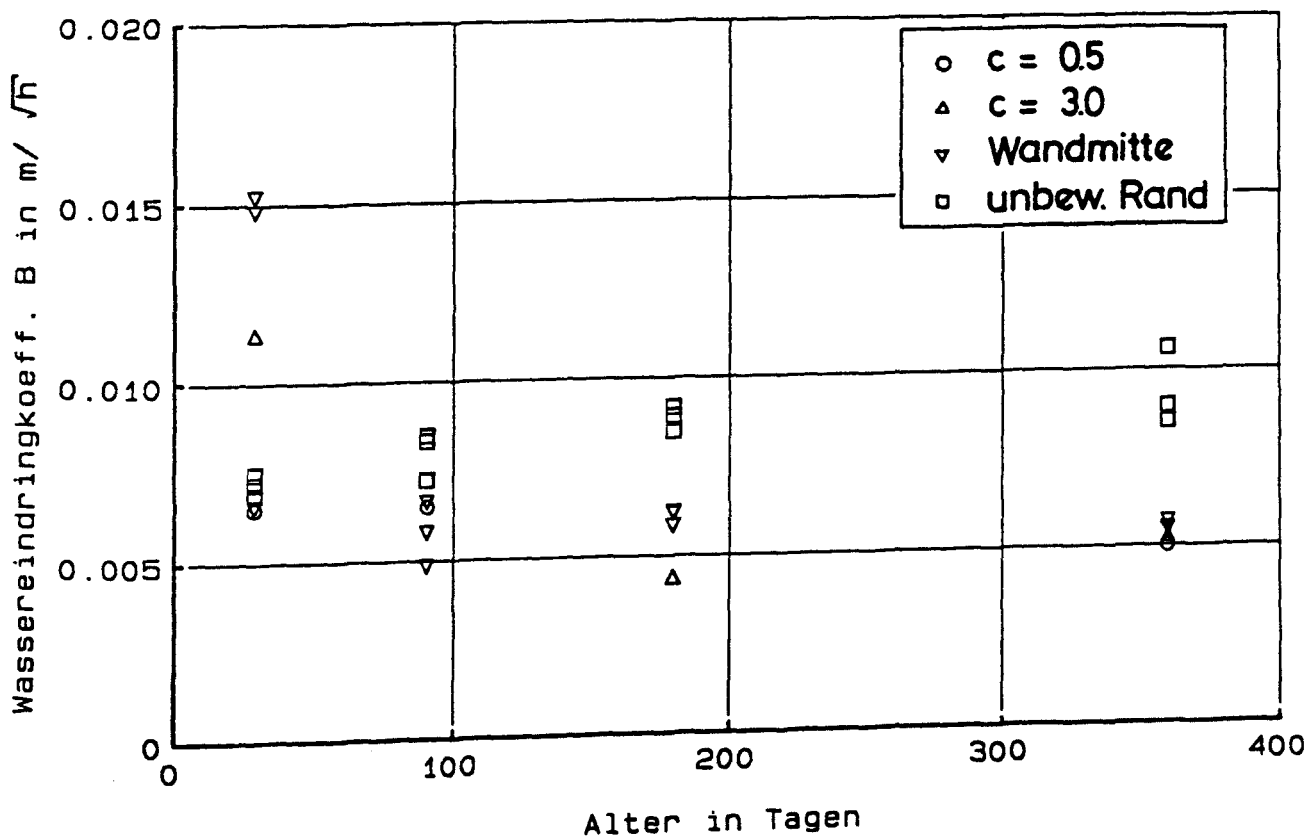


Bild 4.6.165 : Zeitliche Entwicklung des Wassereindringkoeffizienten von Wand IV. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

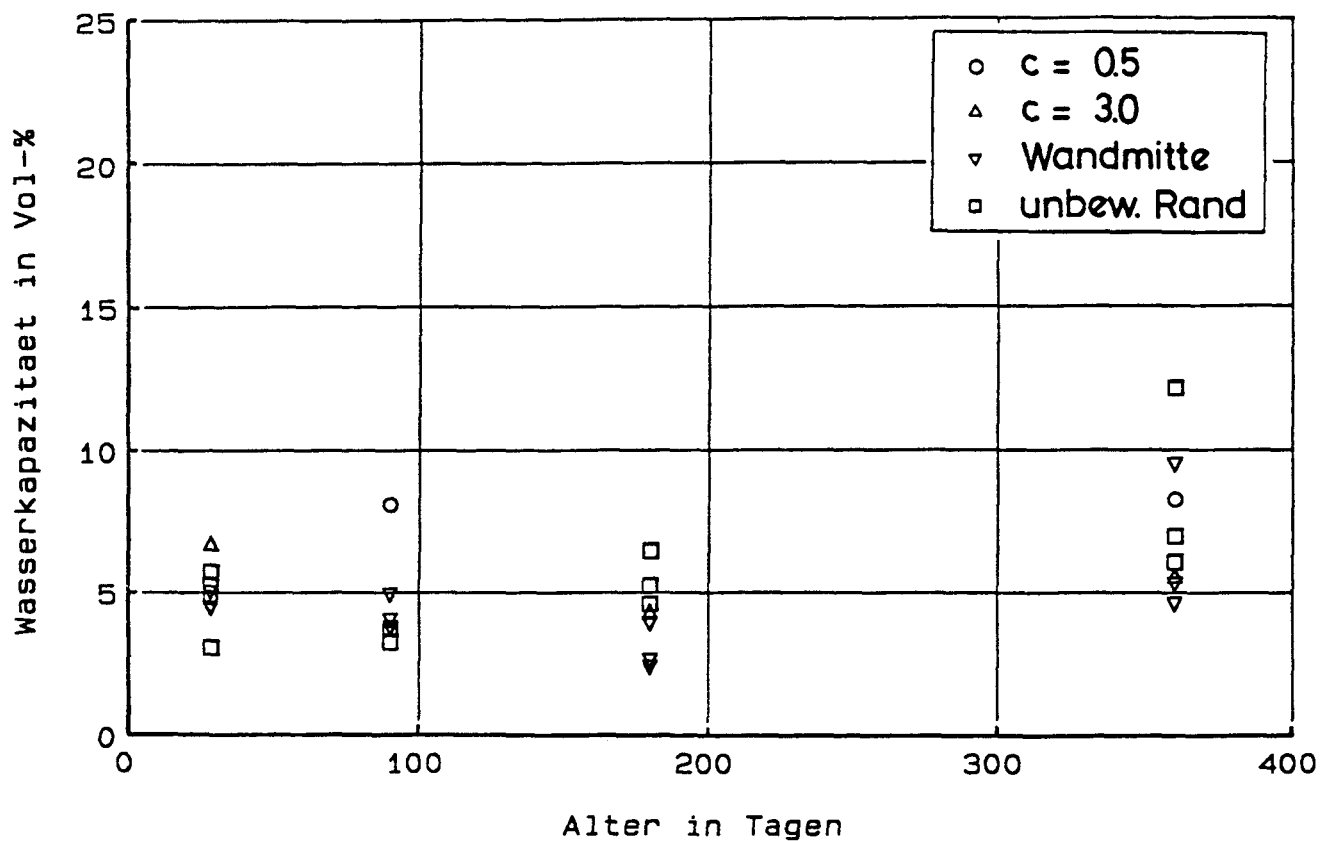


Bild 4.6.166 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand I. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

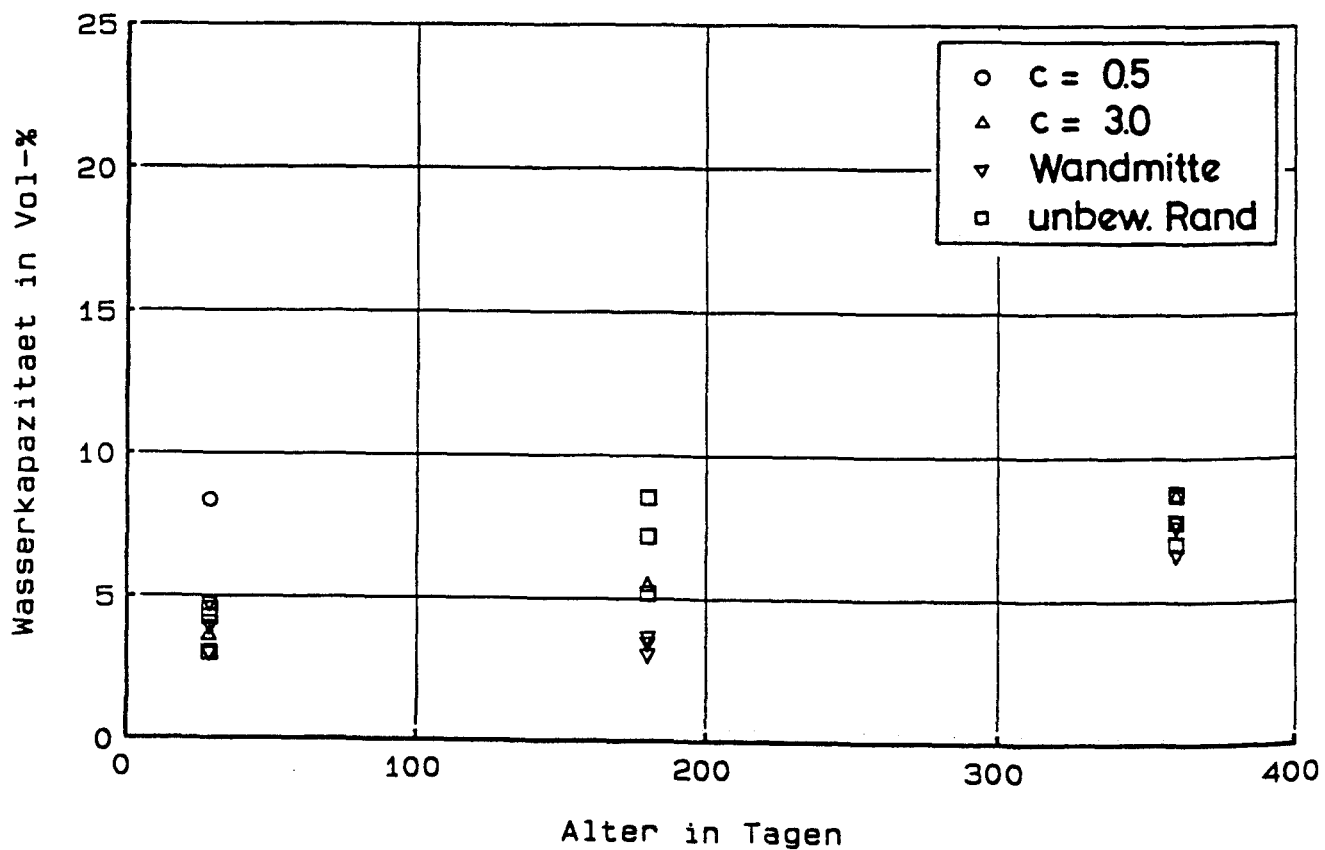


Bild 4.6.167 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand II. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

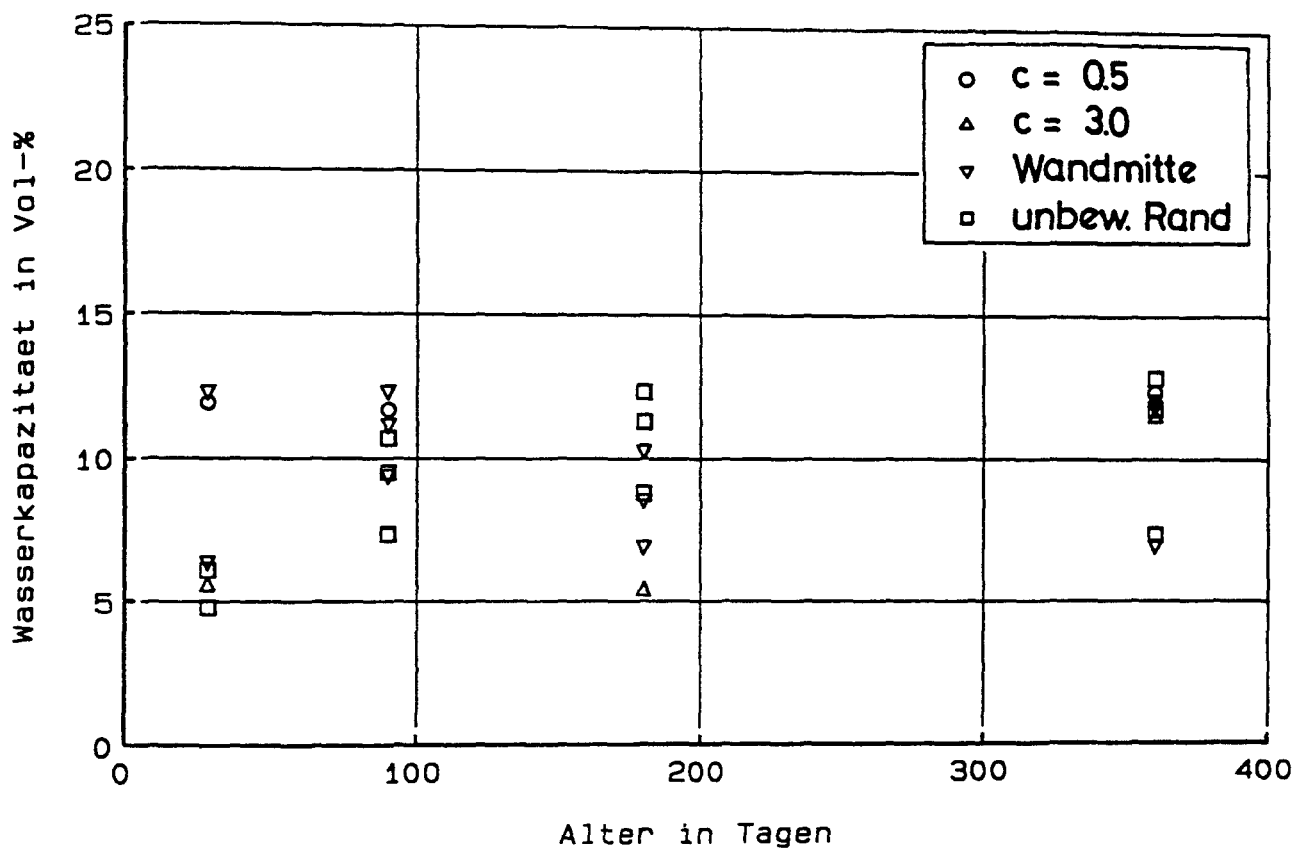


Bild 4.6.168 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand III. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

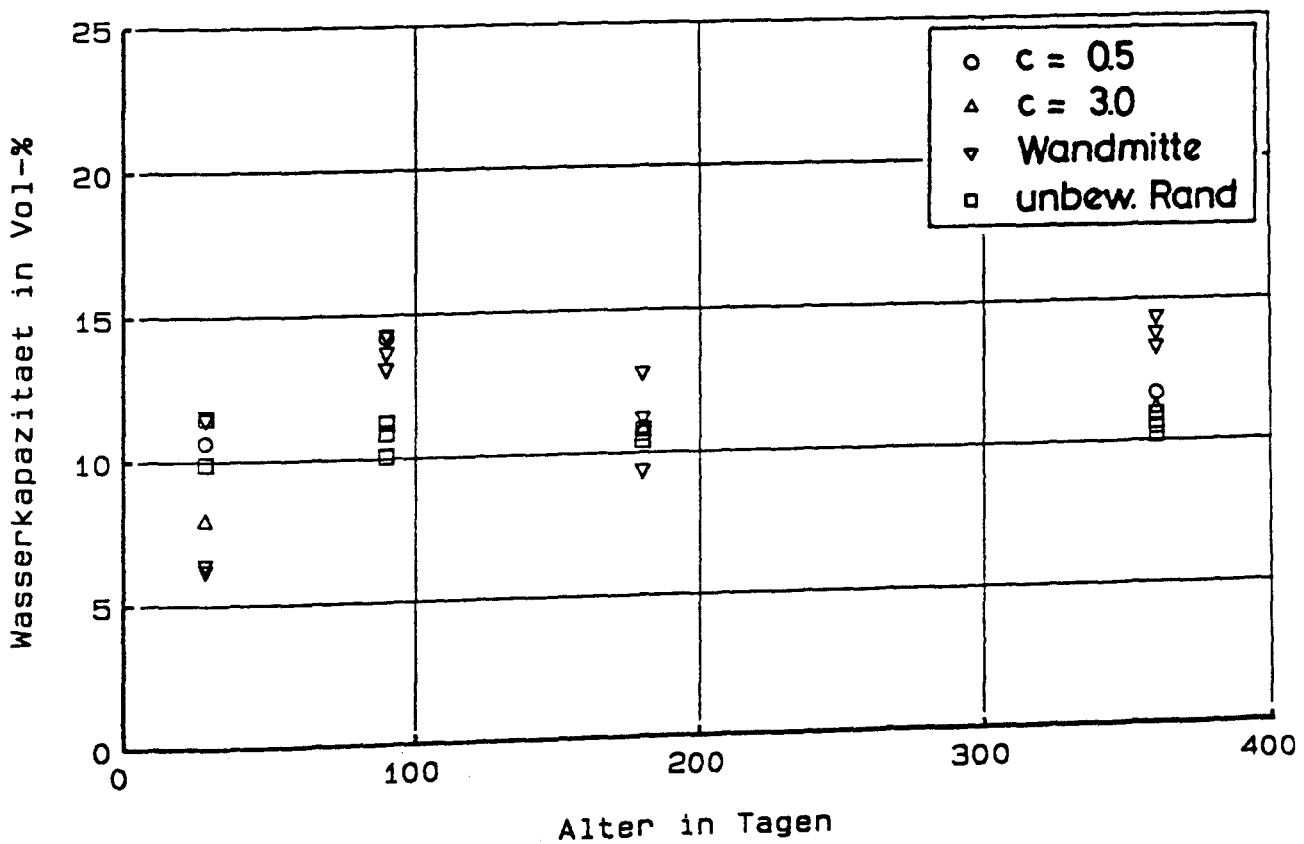


Bild 4.6.169 : Zeitliche Entwicklung der Wasserkapazität von Wand IV. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

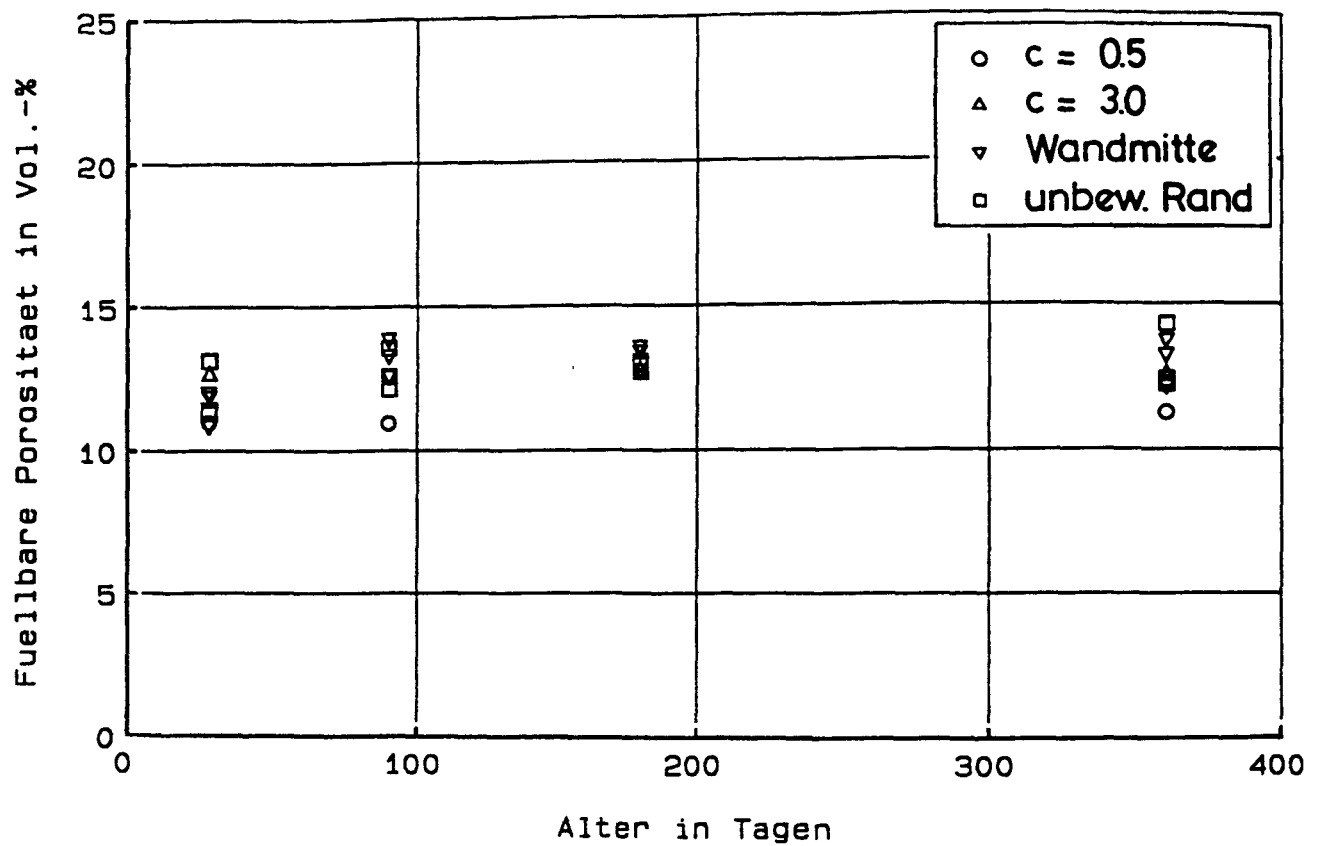


Bild 4.6.170 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand I. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

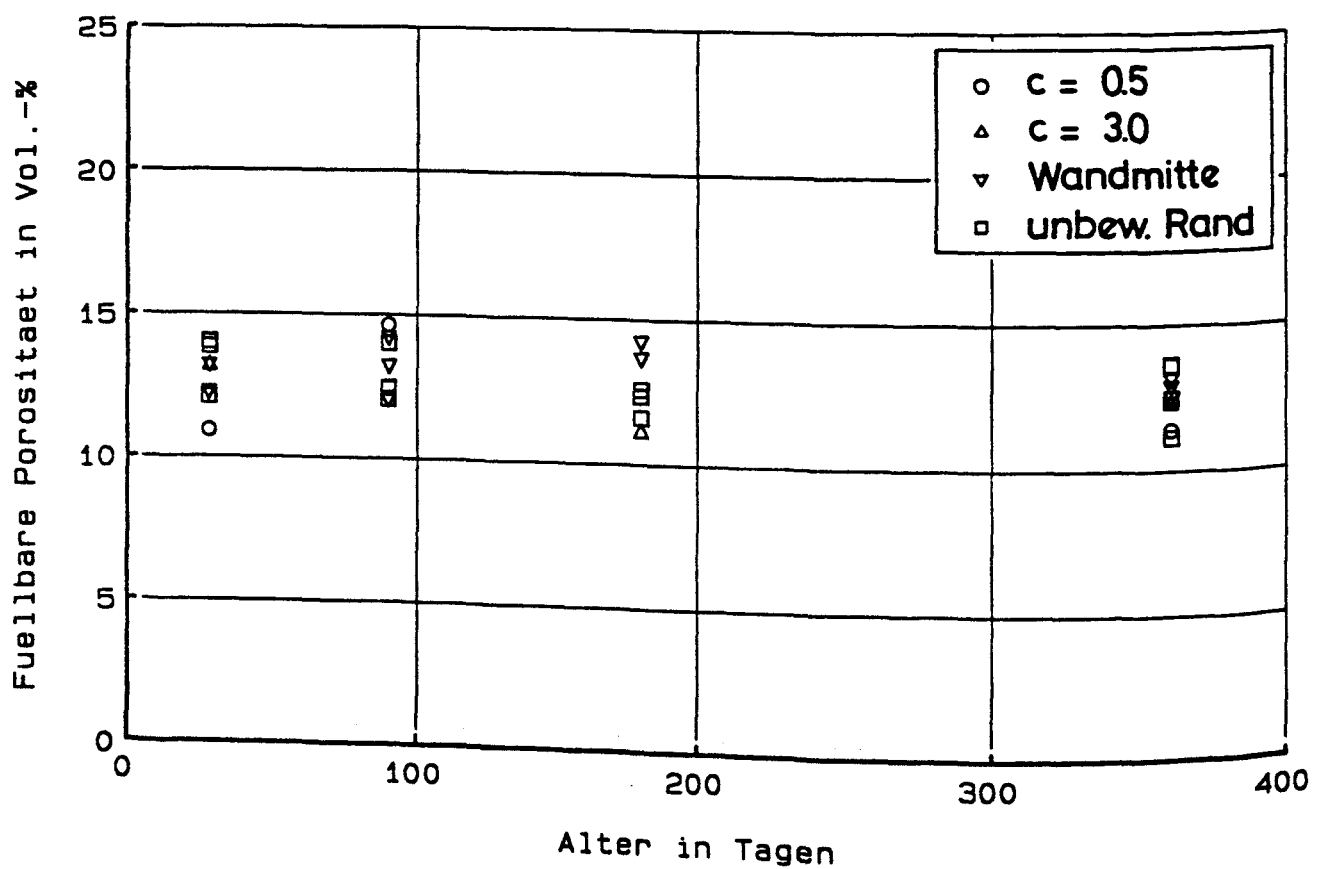


Bild 4.6.171 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand II. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

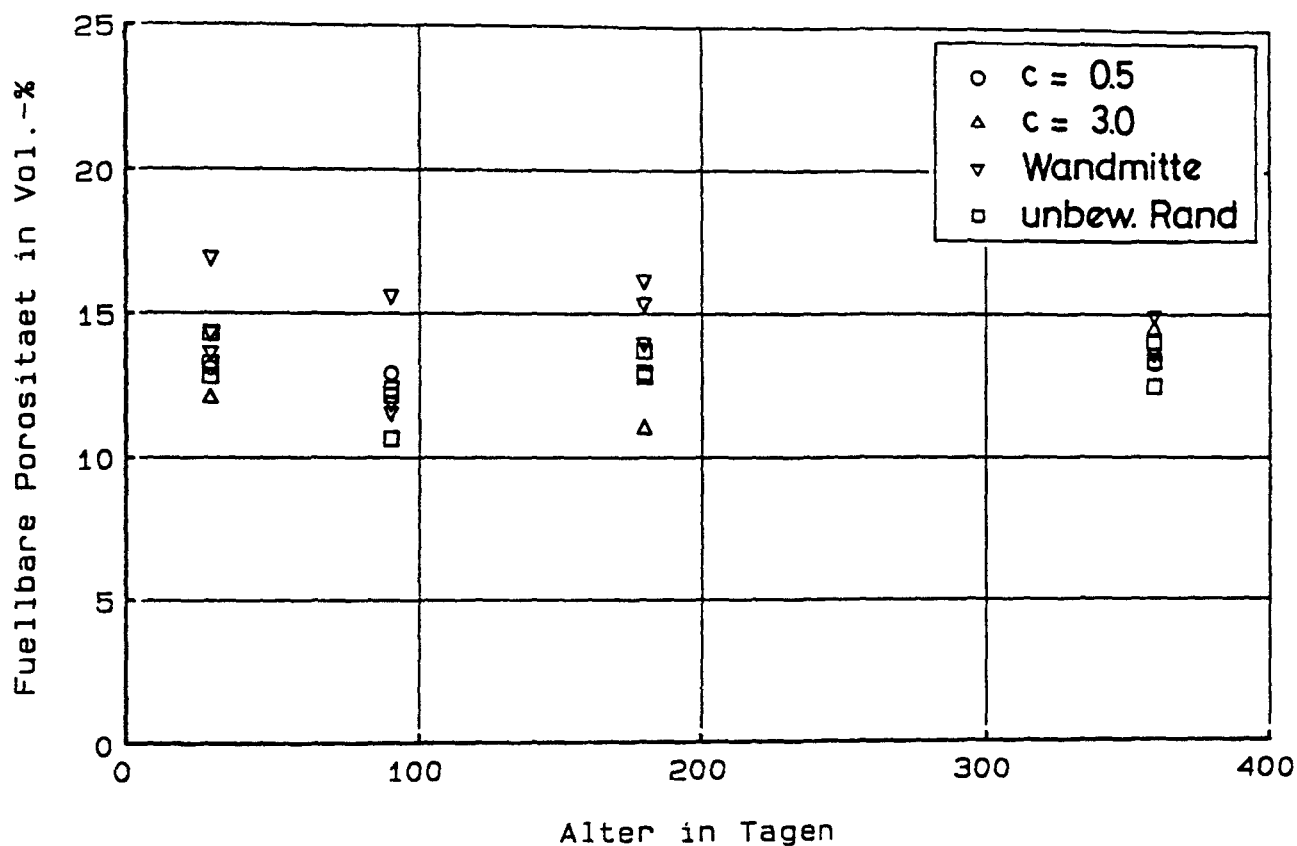


Bild 4.6.172 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand III. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

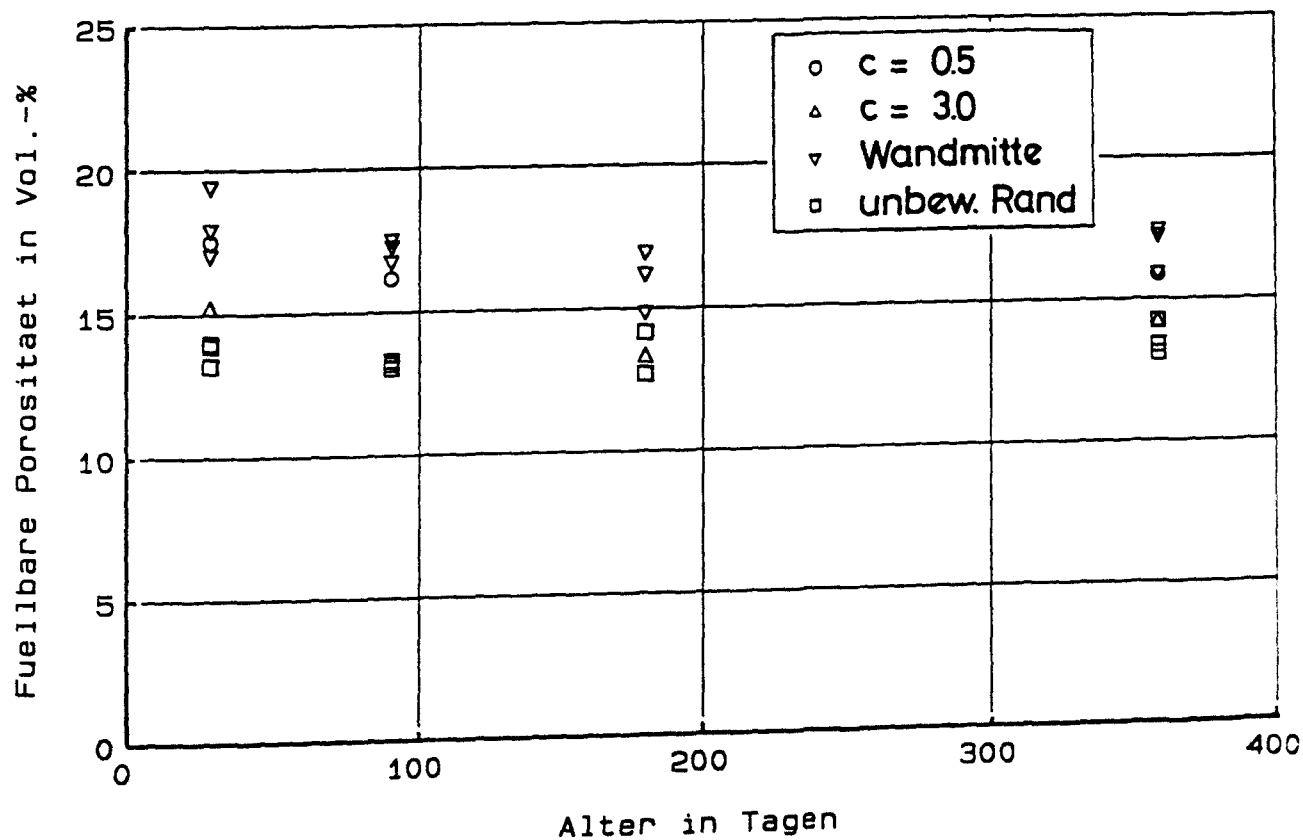


Bild 4.6.173 : Zeitliche Entwicklung der füllbaren Porosität von Wand IV. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

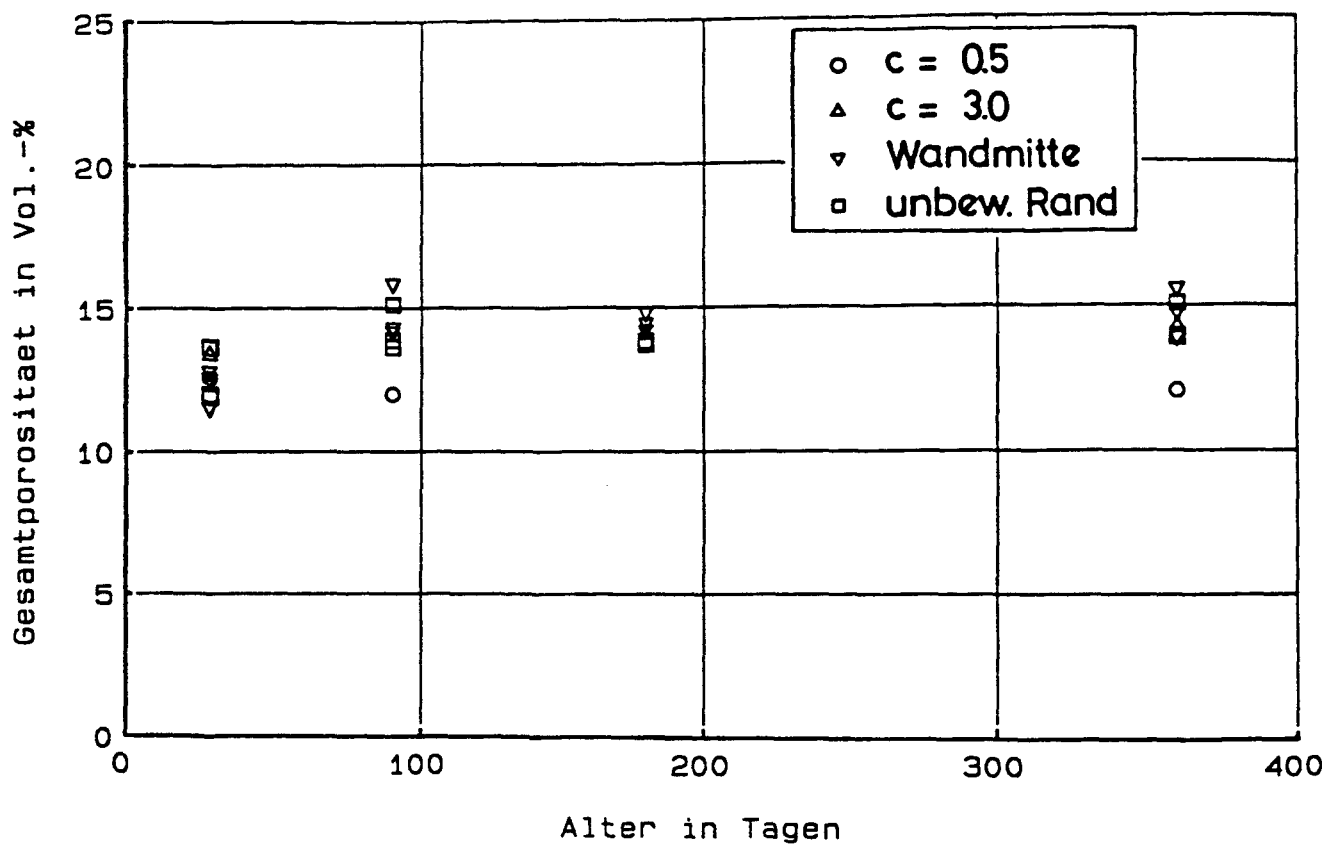


Bild 4.6.174 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand I. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

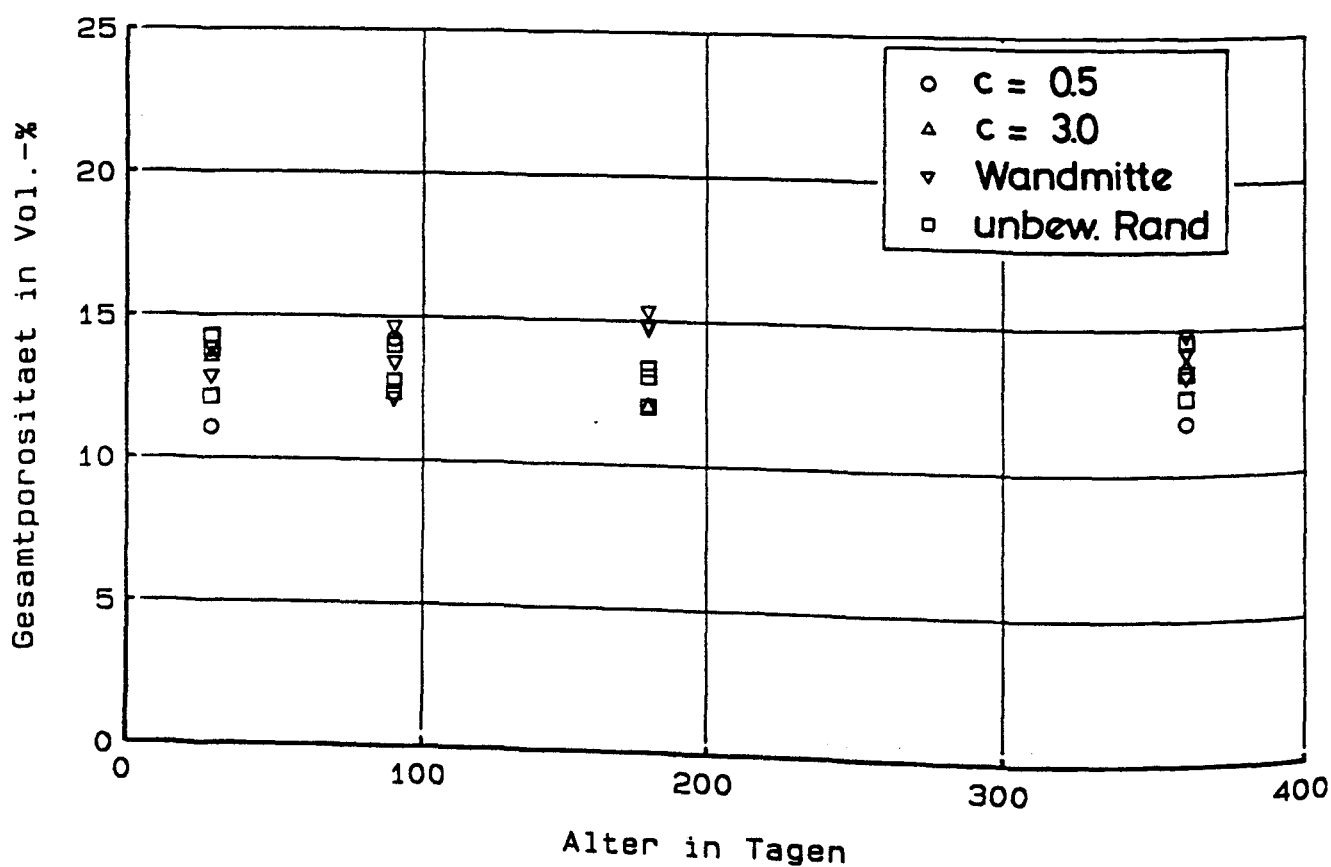


Bild 4.6.175 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand II. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

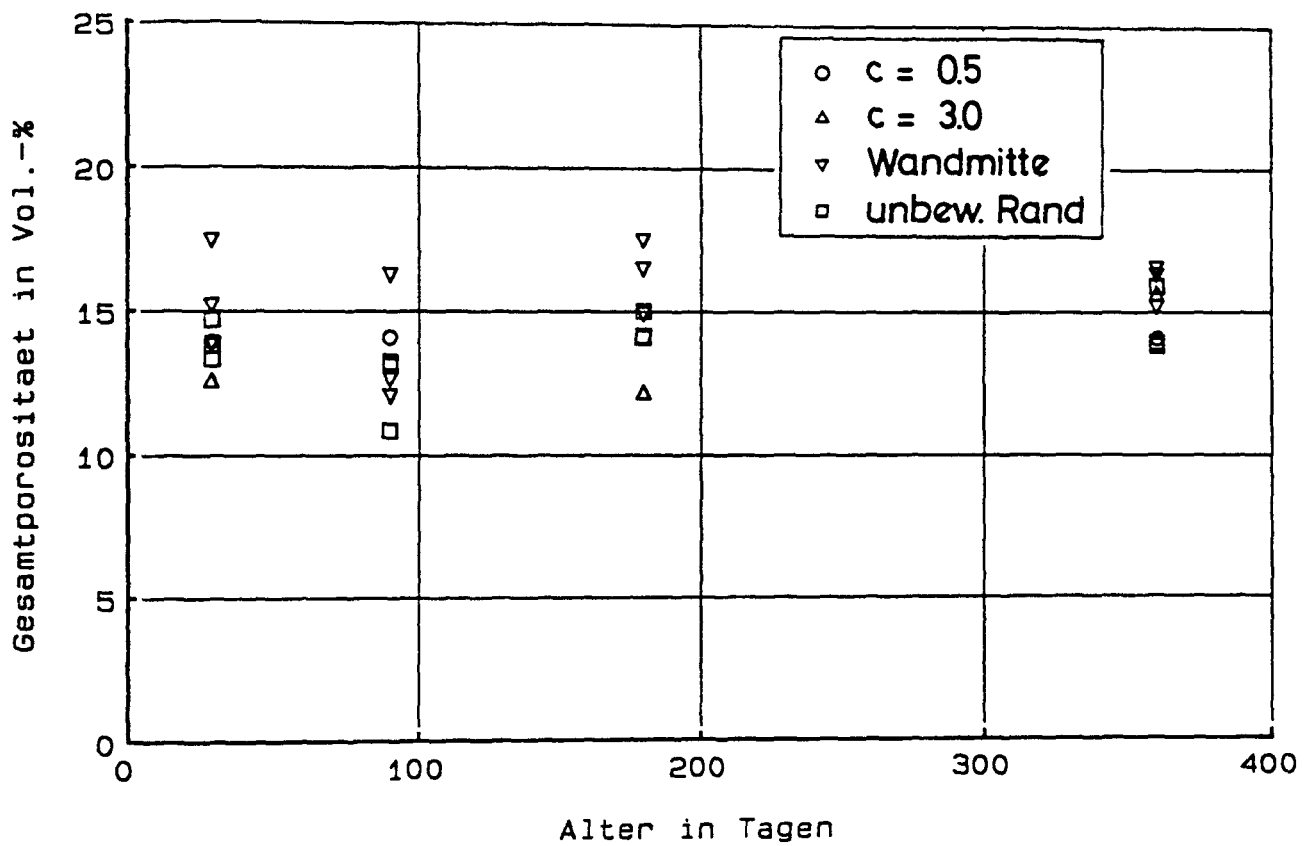


Bild 4.6.176 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand III. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

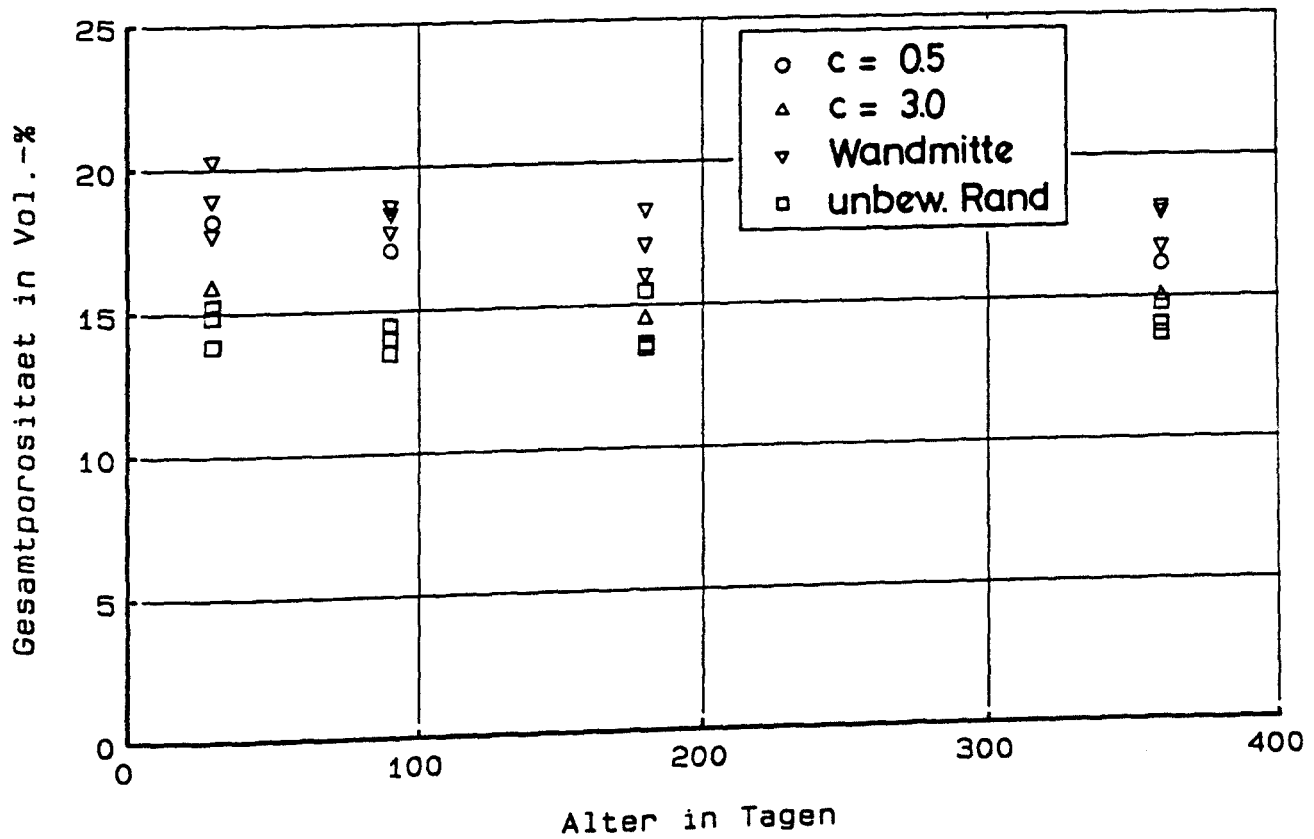


Bild 4.6.177 : Zeitliche Entwicklung der Gesamtporosität von Wand IV. (Proben aus vier verschiedenen Wandbereichen)

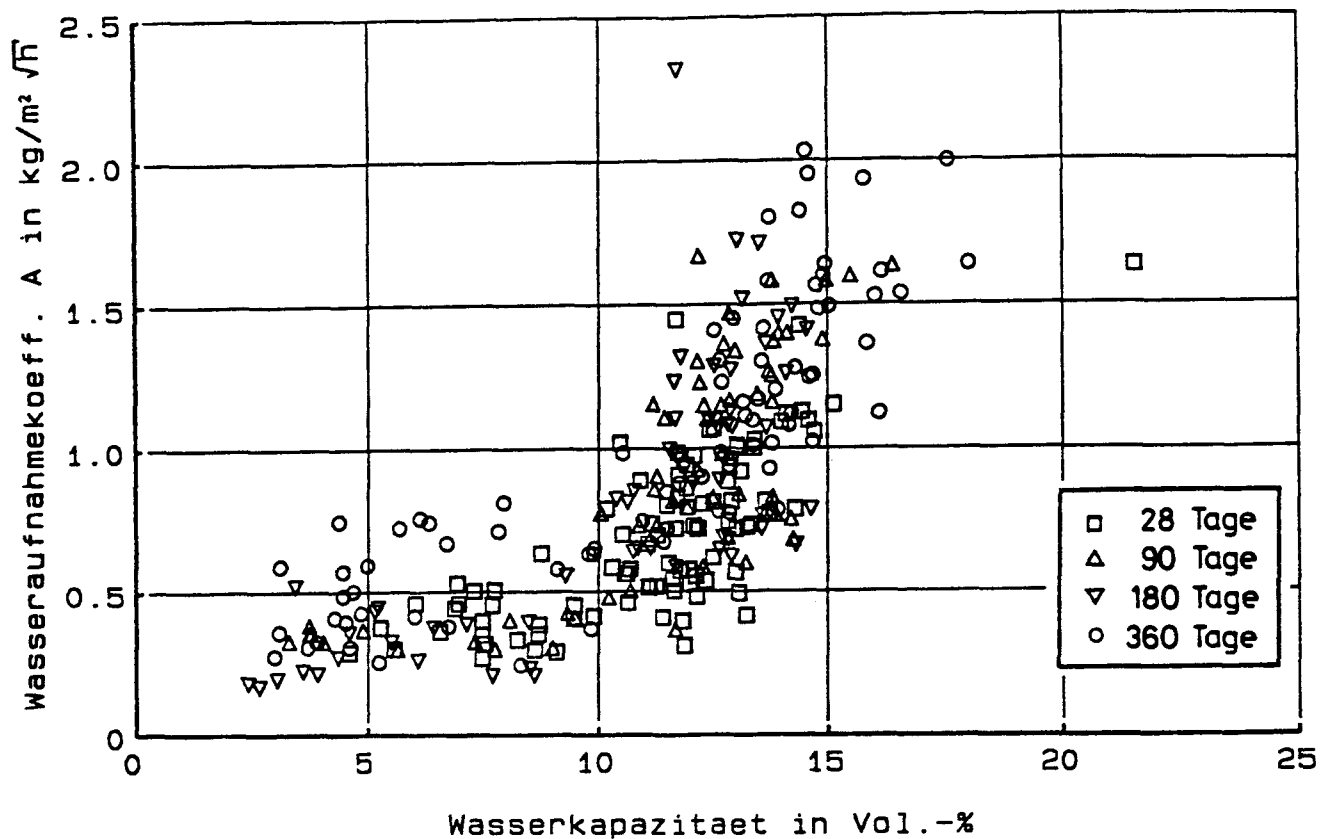


Bild 4.6.178 : Beziehung zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten und der Wasserkapazität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände berücksichtigt.)

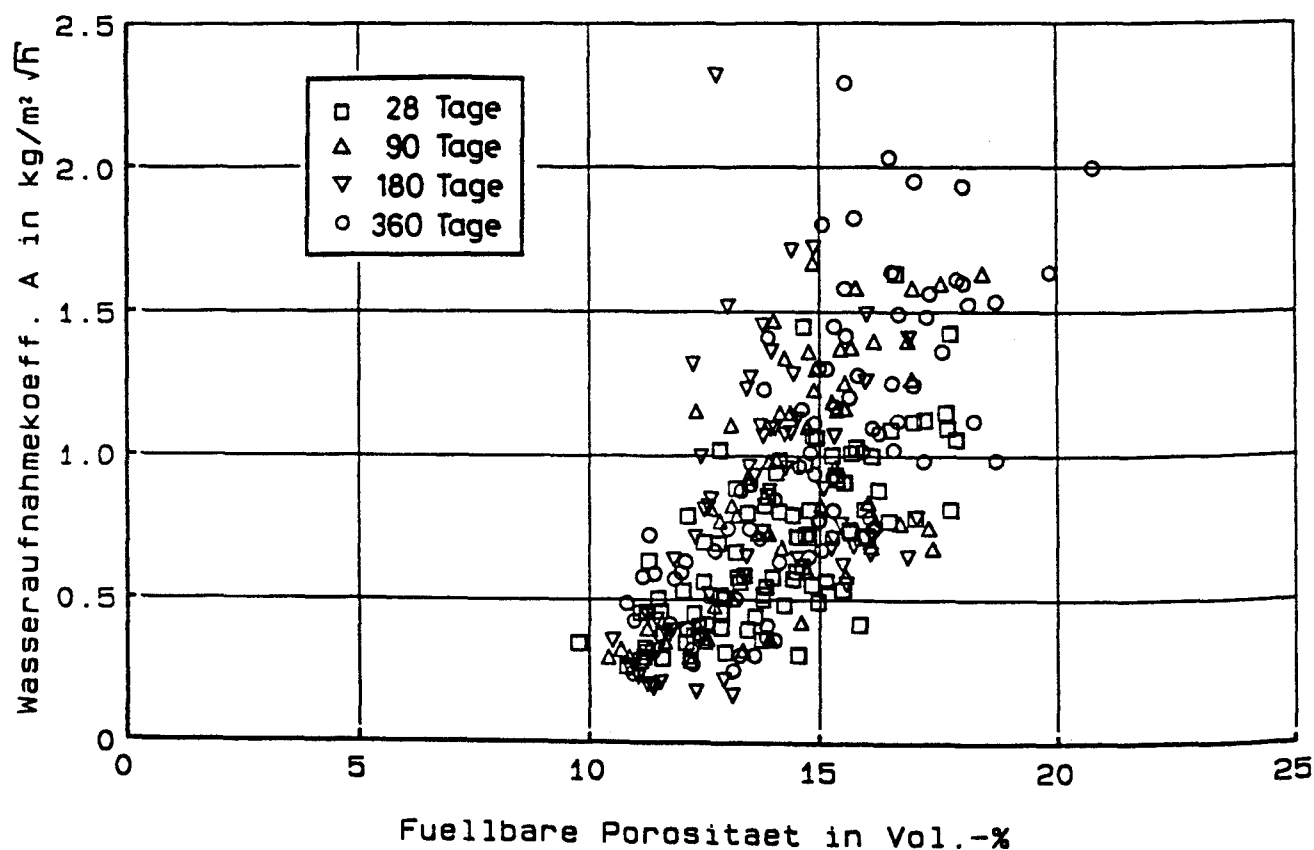


Bild 4.6.179 : Beziehung zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten und der füllbaren Porosität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände berücksichtigt.)

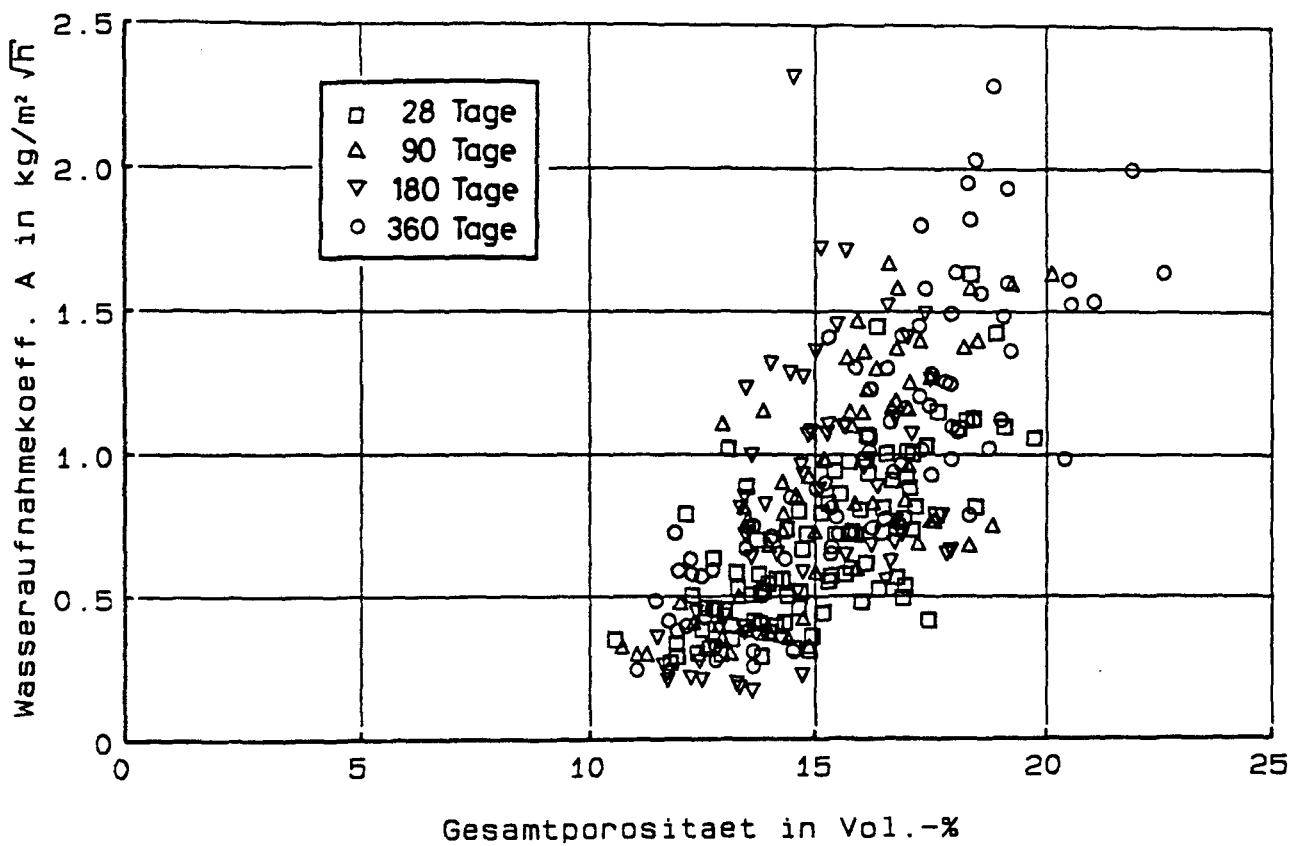


Bild 4.6.180 : Beziehung zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten und der Gesamtporosität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände berücksichtigt.)

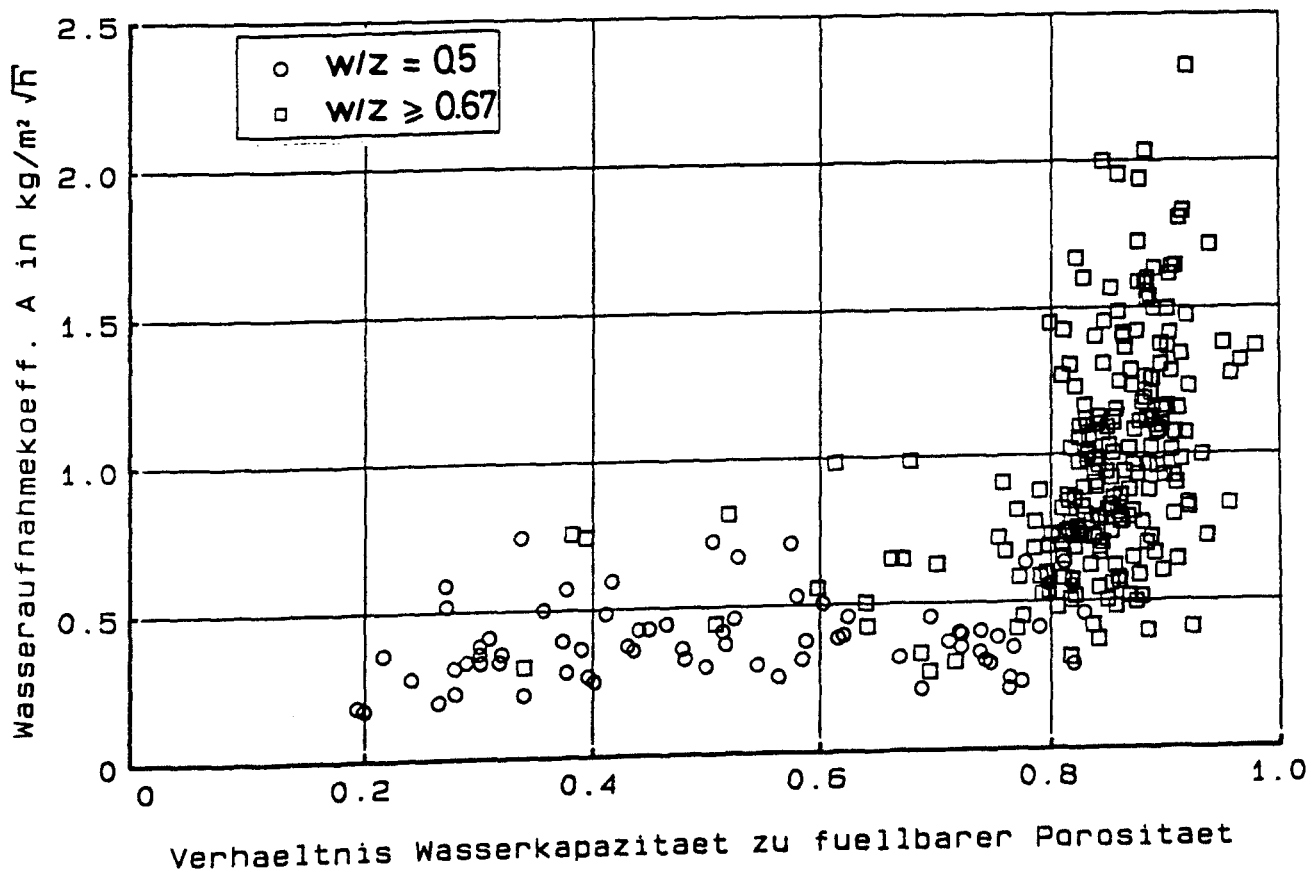


Bild 4.6.181 : Beziehung zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten und dem Verhältnis Wasserkapazität zu füllbarer Porosität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände berücksichtigt.)

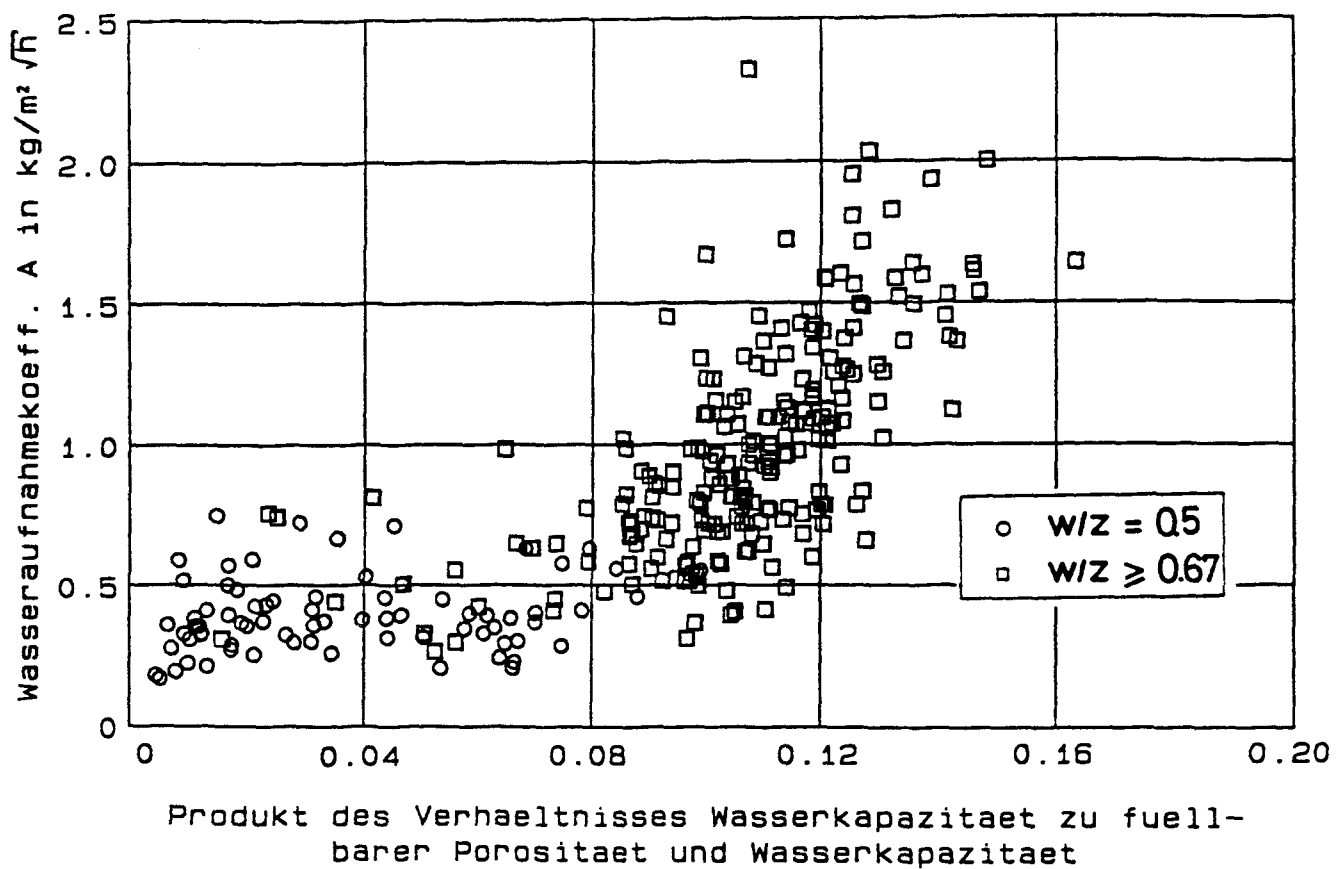


Bild 4.6.182 : Beziehung zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten und dem Produkt aus dem Verhältnis Wasserkapazität zu füllbarer Porosität und der Wasserkapazität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände berücksichtigt.)

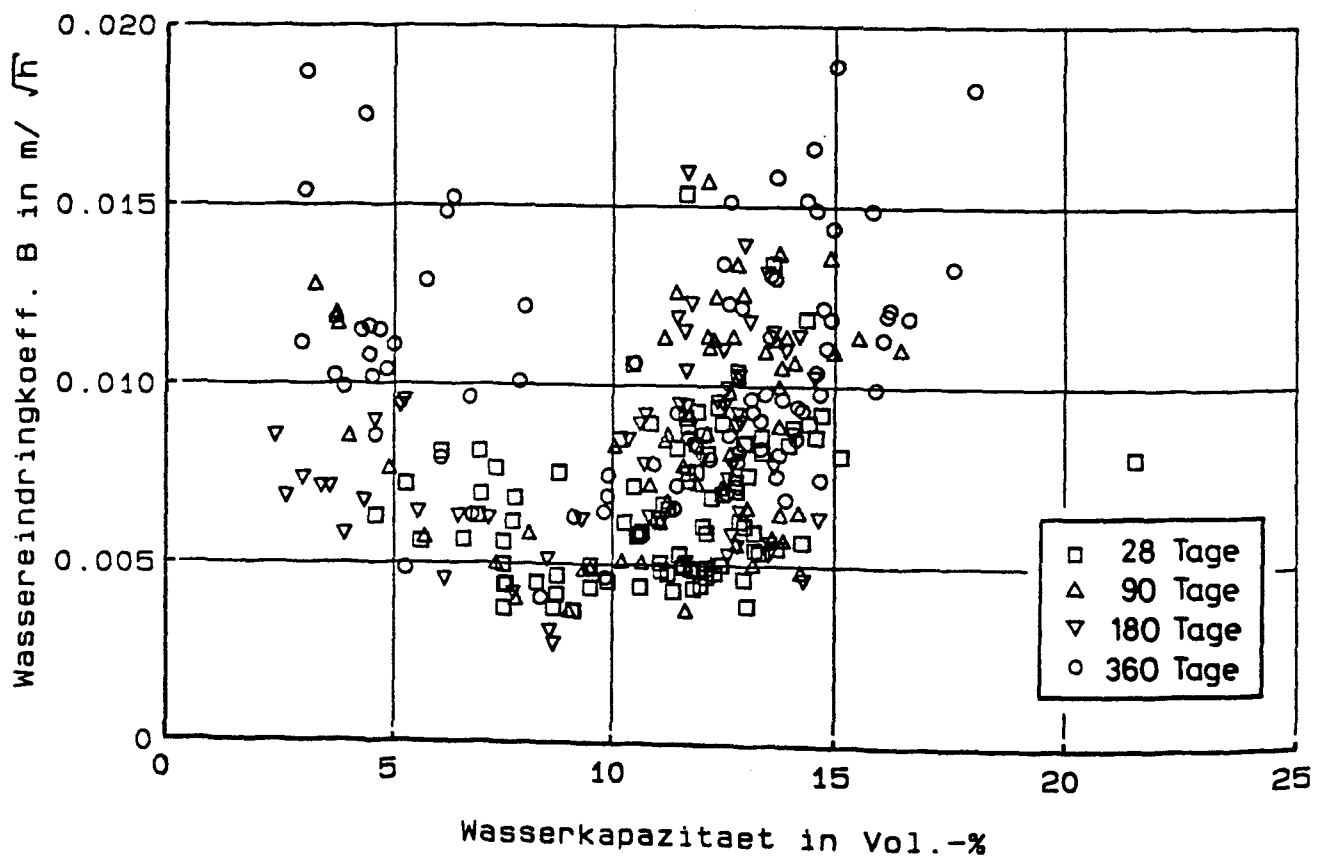


Bild 4.6.183 : Beziehung zwischen dem Wassereindringkoeffizienten und der Wasserkapazität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände berücksichtigt.)

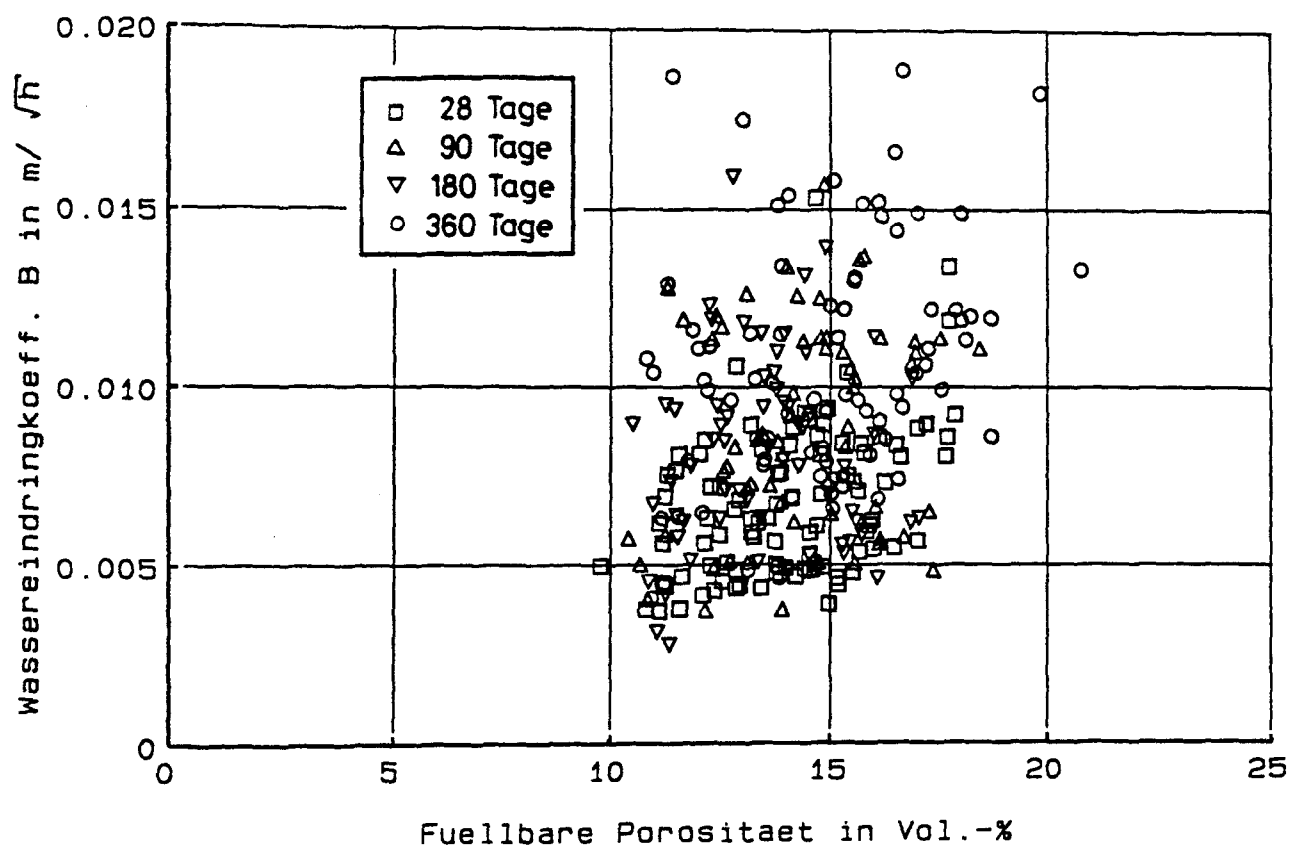


Bild 4.6.184 : Beziehung zwischen dem Wassereindringkoeffizienten und der füllbaren Porosität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände berücksichtigt.)

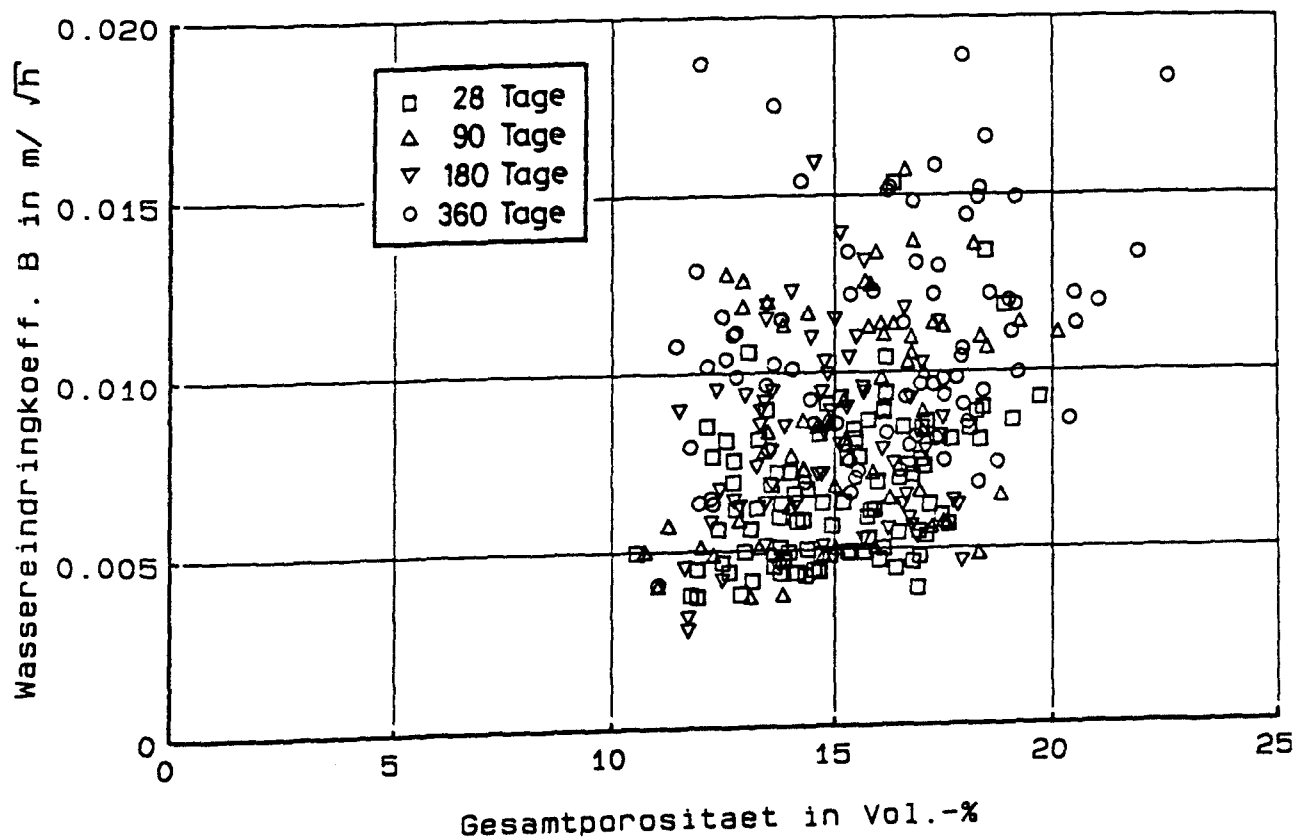
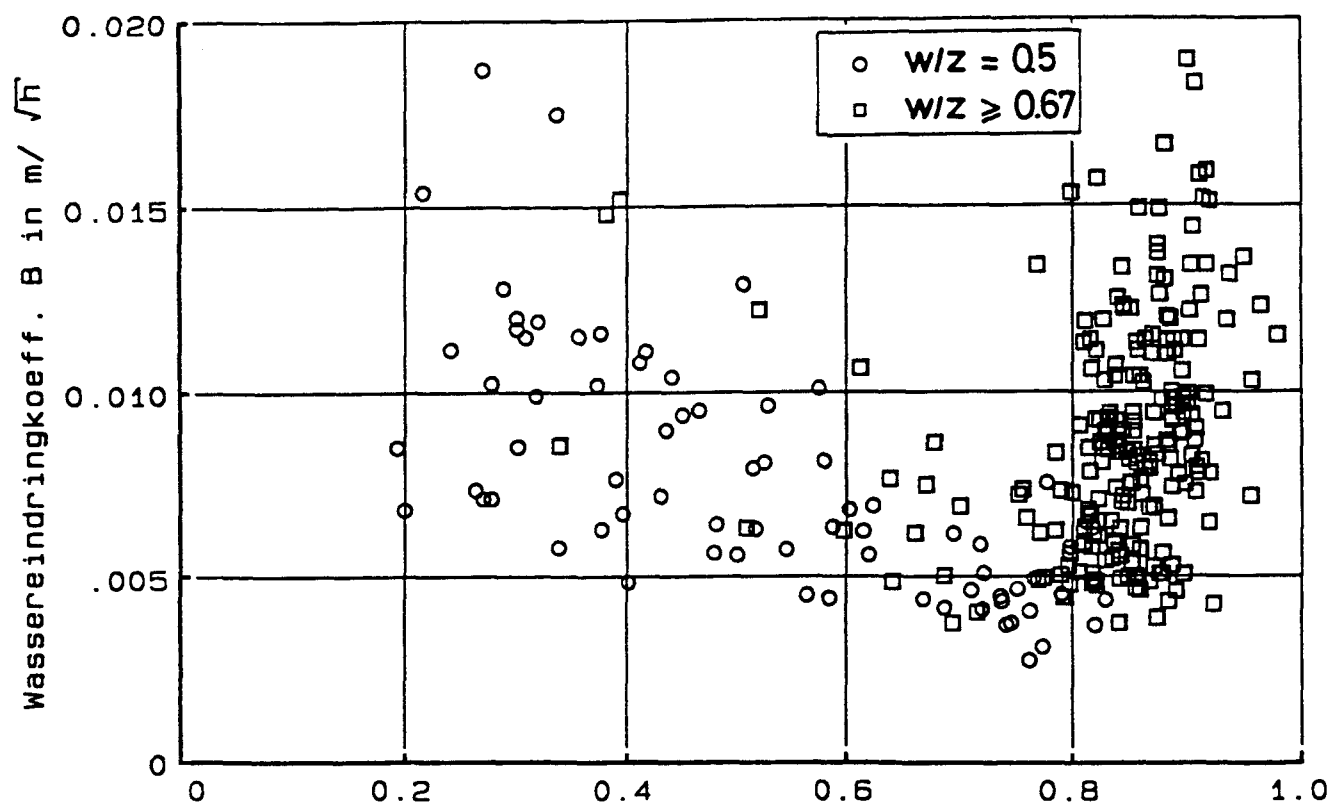
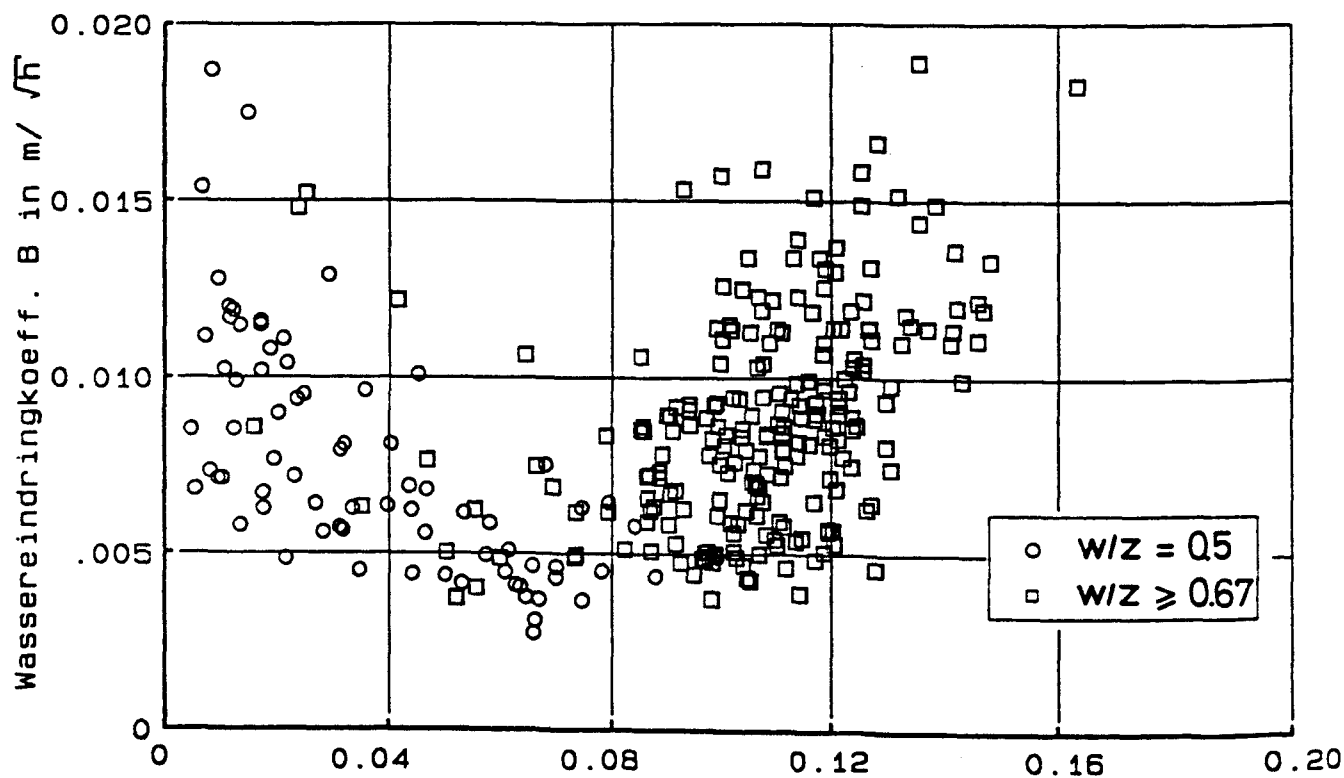


Bild 4.6.185 : Beziehung zwischen dem Wassereindringkoeffizienten und der Gesamtporosität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände berücksichtigt.)



Verhaeltnis von Wasserkapazitaet zu fuehlbarer Porositaet

Bild 4.6.186 : Beziehung zwischen dem Wassereindringkoeffizienten und dem Verhaeltnis Wasserkapazitaet zu fuehlbarer Porositaet. (Es sind die Ergebnisse aller Waende beruecksichtigt.)



Produkt des Verhaeltnisses Wasserkapazitaet zu fuehlbarer Porositaet und der Wasserkapazitaet

Bild 4.6.187 : Beziehung zwischen dem Wassereindringkoeffizienten und dem Produkt aus dem Verhaeltnis Wasserkapazitaet zu fuehlbarer Porositaet und der Wasserkapazitaet. (Es sind die Ergebnisse aller Waende beruecksichtigt.)

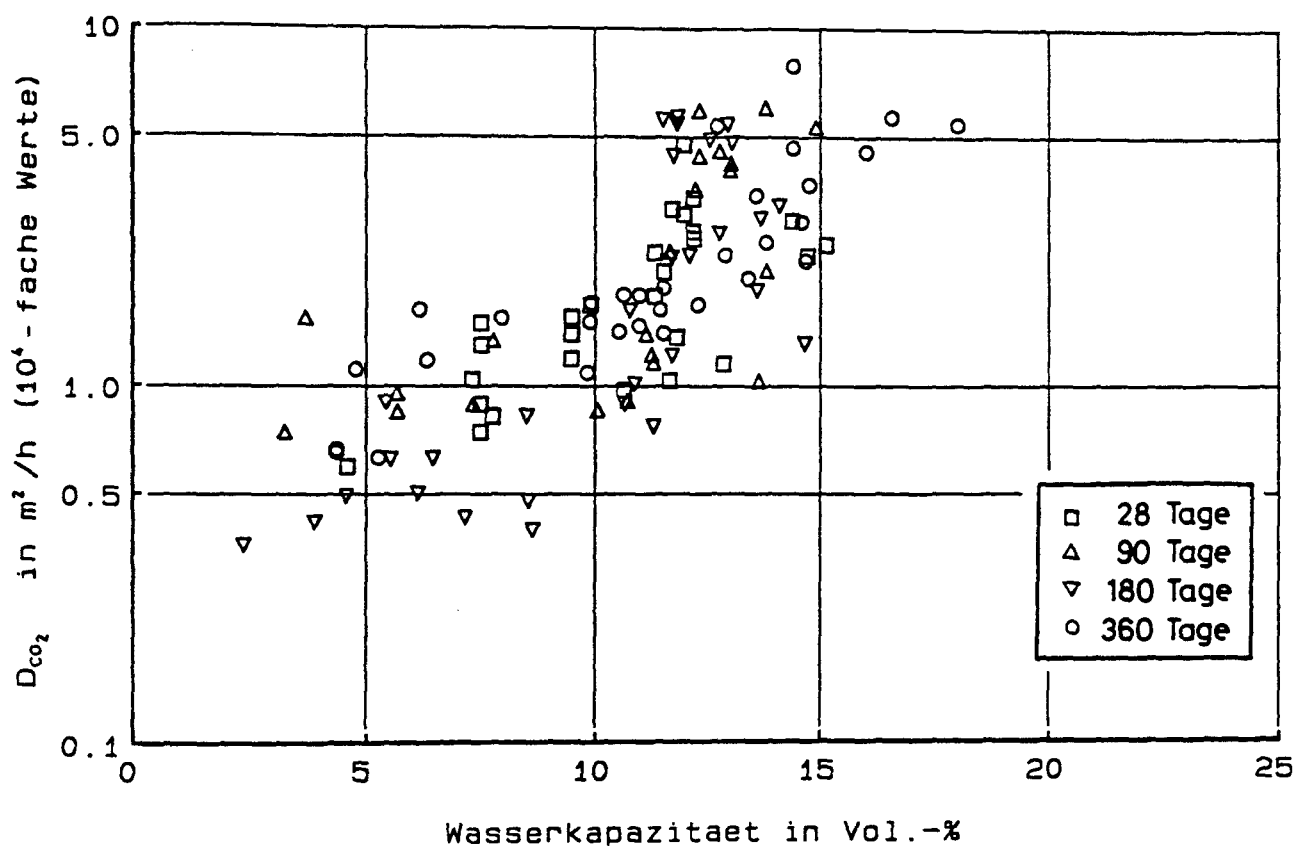


Bild 4.6.188 : Beziehung zwischen dem CO₂-Diffusionskoeffizienten und der Wasserkapazität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände der 9-11 mm dicken Proben berücksichtigt.)

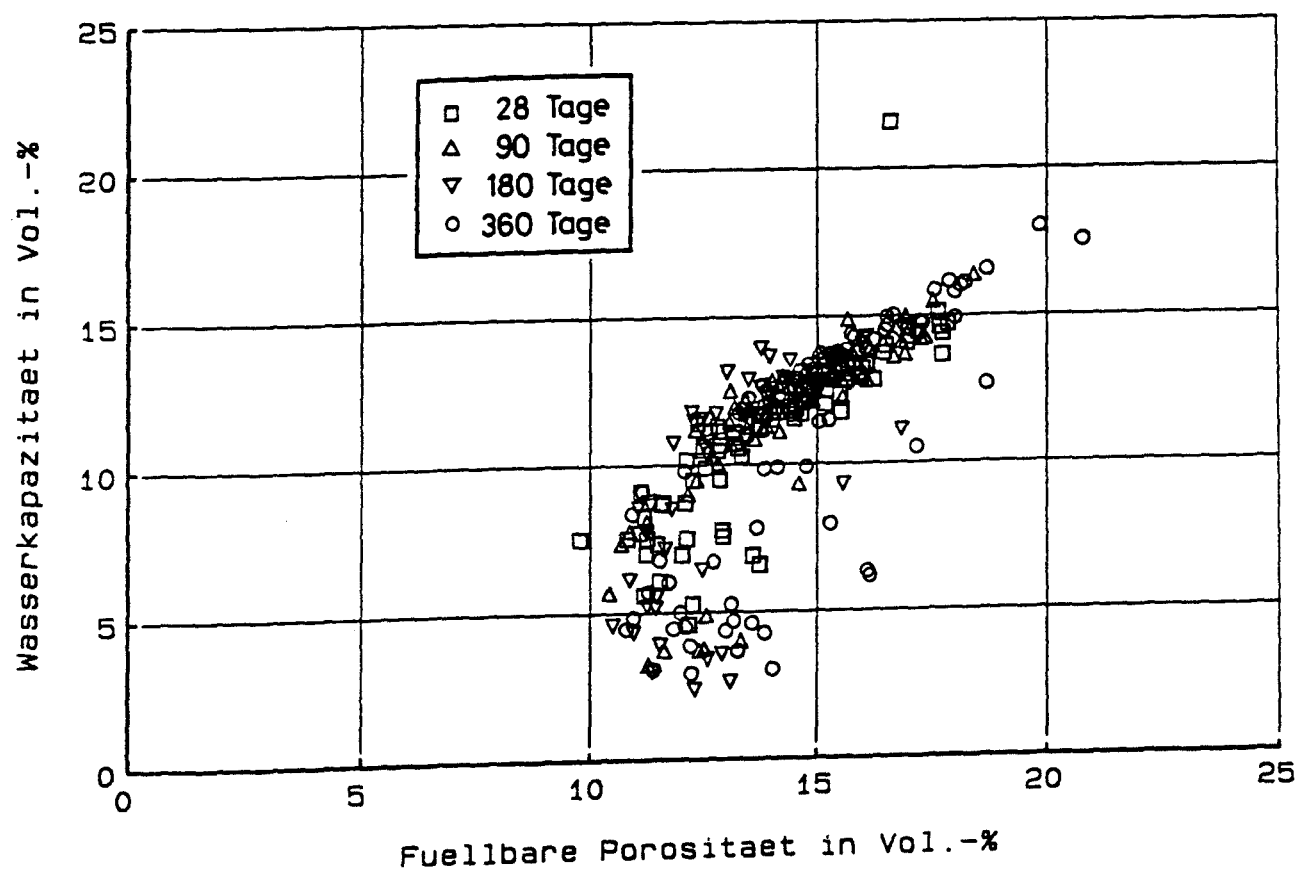


Bild 4.6.189 : Beziehung zwischen der Wasserkapazität und der füllbaren Porosität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände berücksichtigt.)

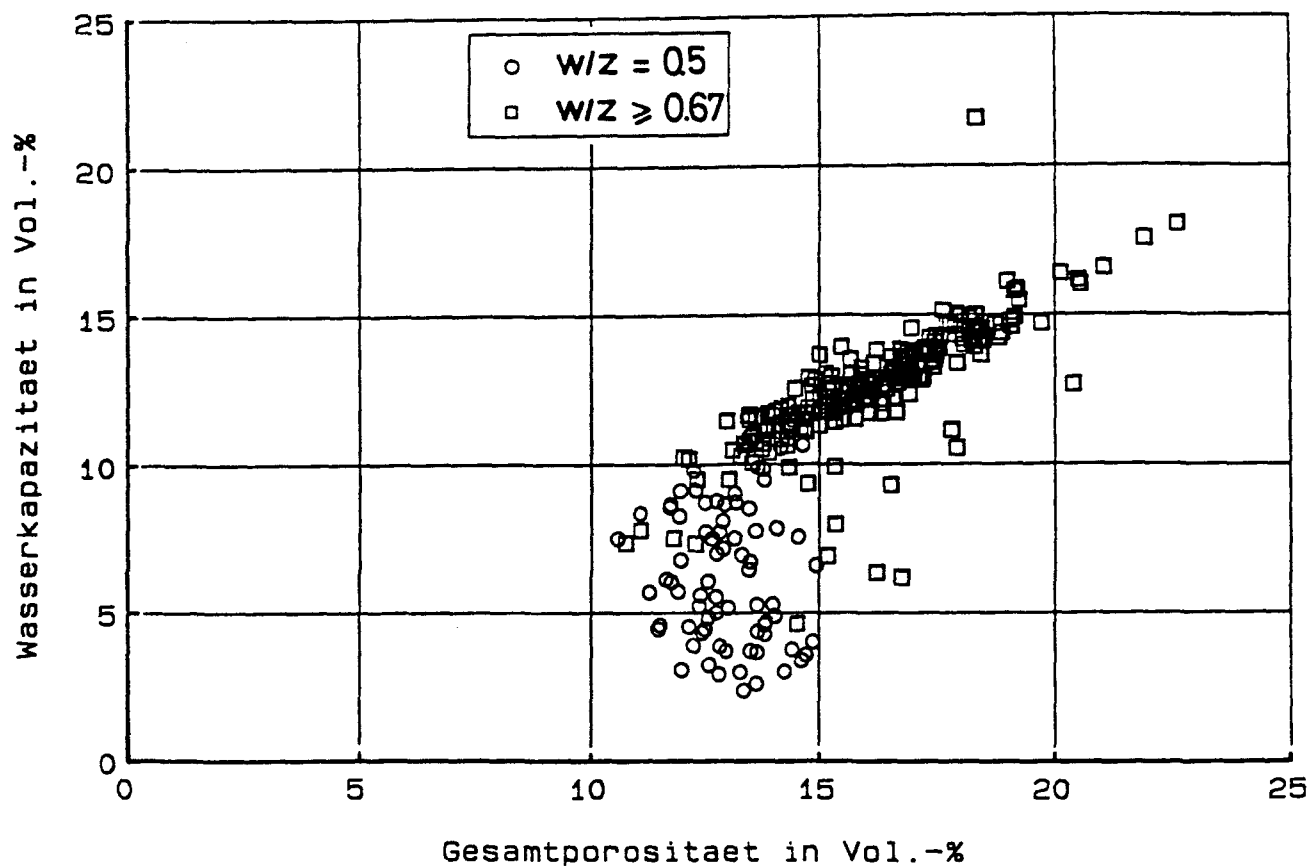


Bild 4.6.190 : Beziehung zwischen der Wasserkapazität und der Gesamtporosität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände berücksichtigt.)

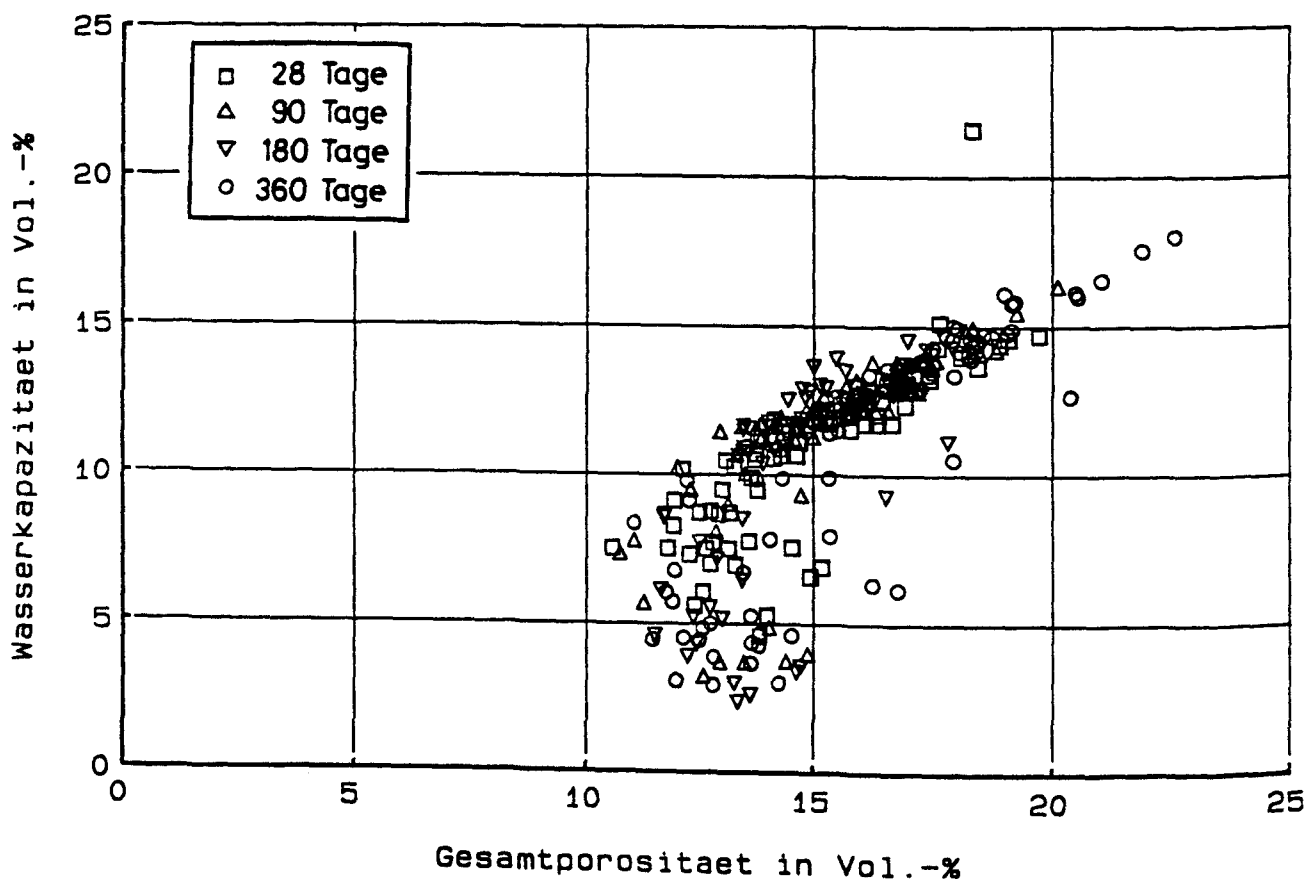


Bild 4.6.191 : Beziehung zwischen der Wasserkapazität und der Gesamtporosität. (Es sind die Ergebnisse aller Wände berücksichtigt.)

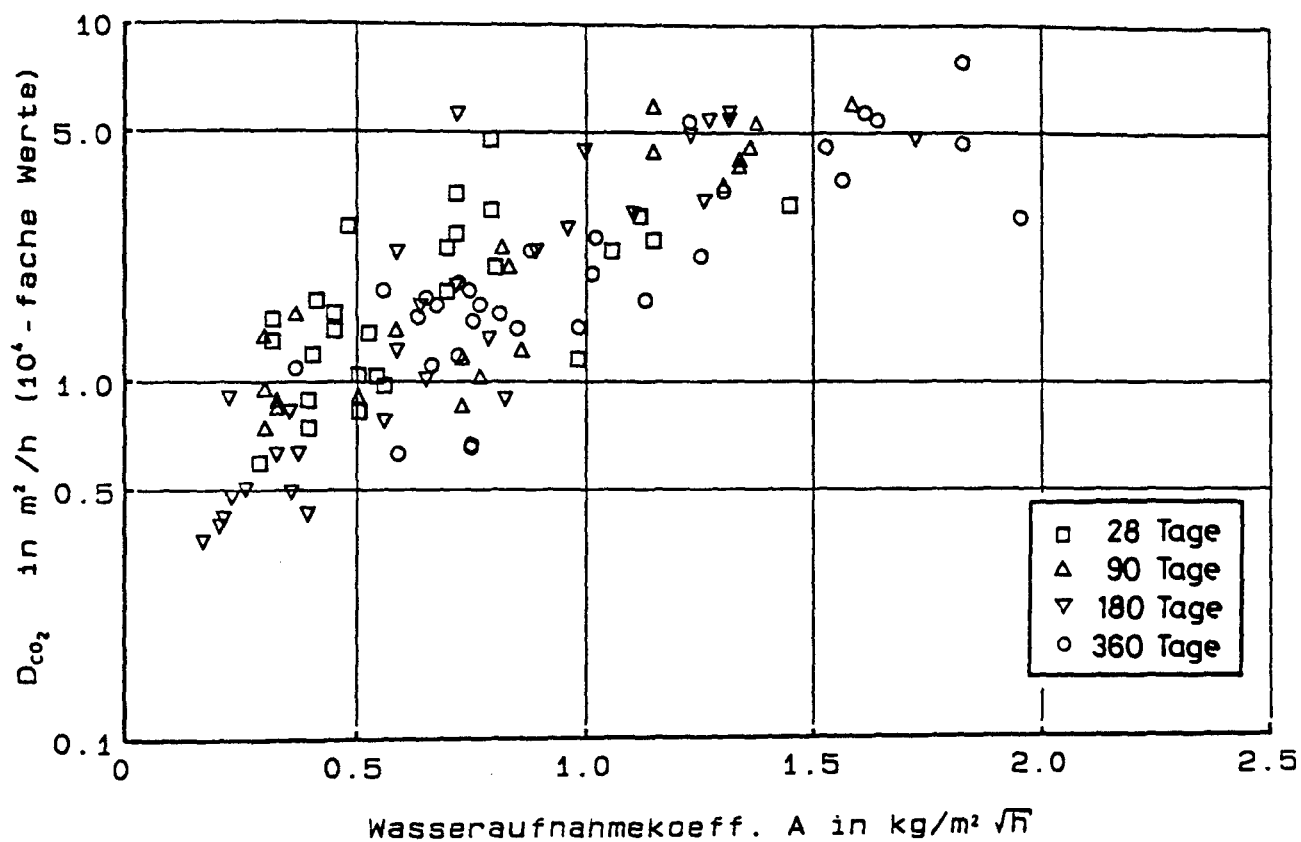


Bild 4.6.192 : Beziehung zwischen dem CO₂-Diffusionskoeffizienten und dem Wasseraufnahmekoeffizienten.
(Es sind die Ergebnisse aller Wände der 9-11 mm dicken Proben berücksichtigt.)

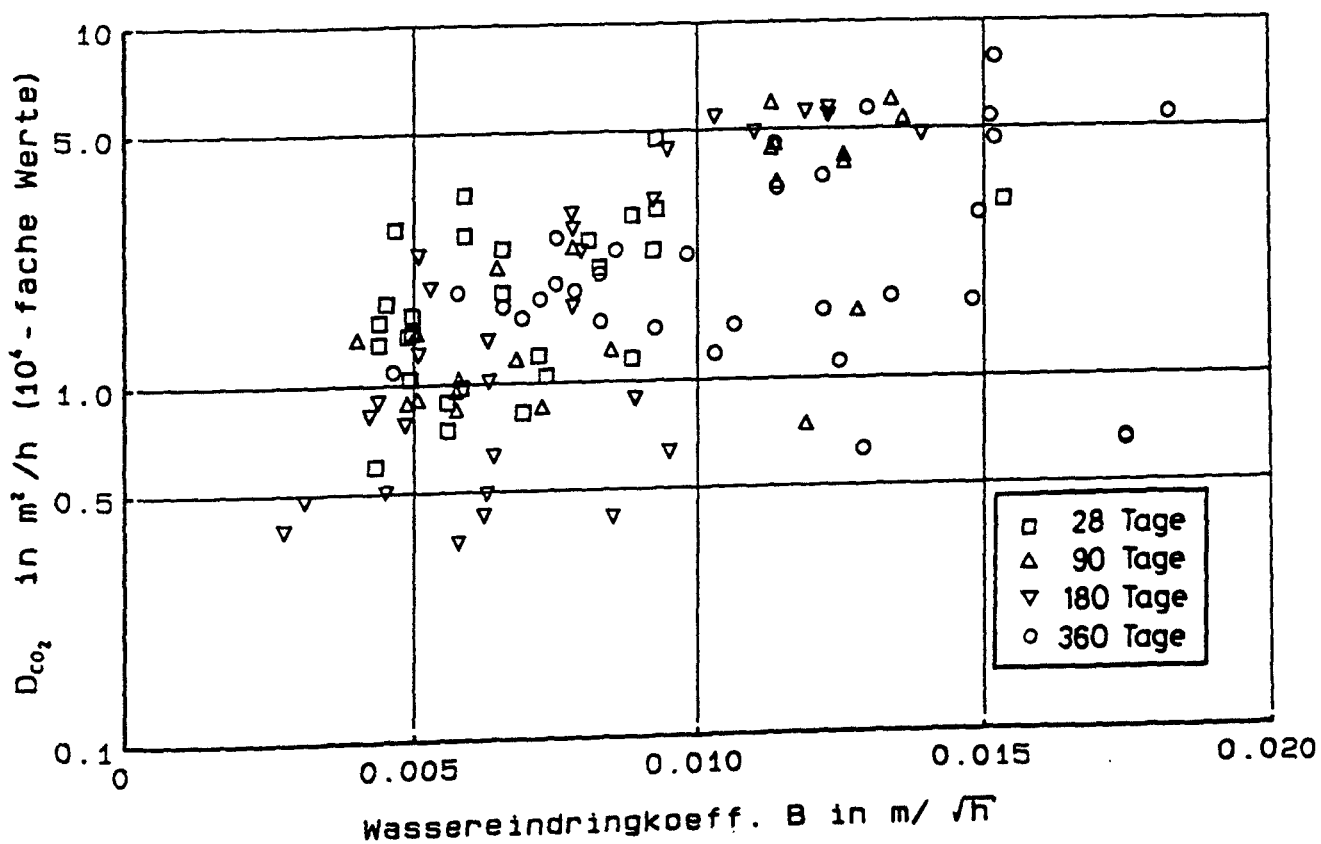


Bild 4.6.193 : Beziehung zwischen dem CO₂-Diffusionskoeffizienten und dem Wassereindringkoeffizienten.
(Es sind die Ergebnisse aller Wände der 9-11 mm dicken Proben berücksichtigt.)

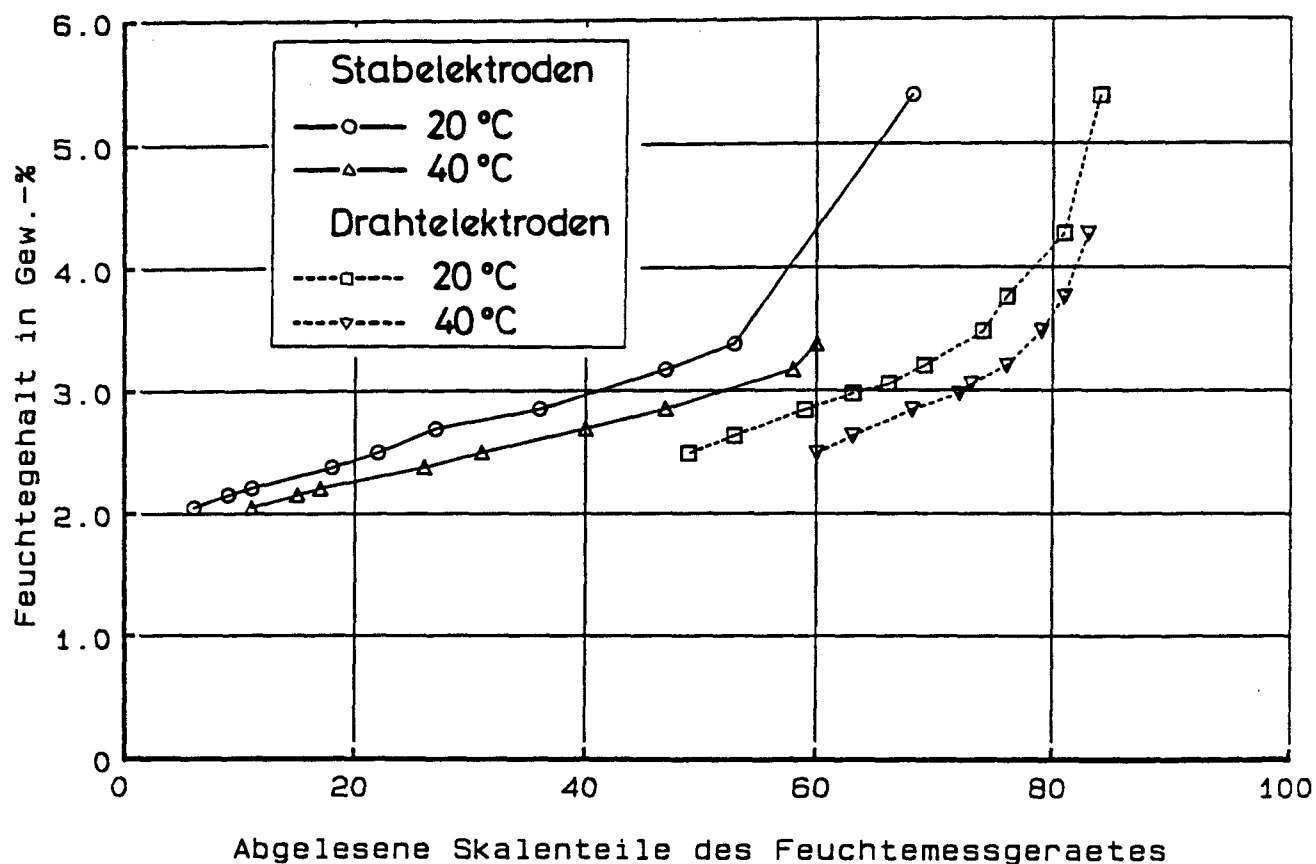


Bild 4.7.1 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand I, Eichkörper a)

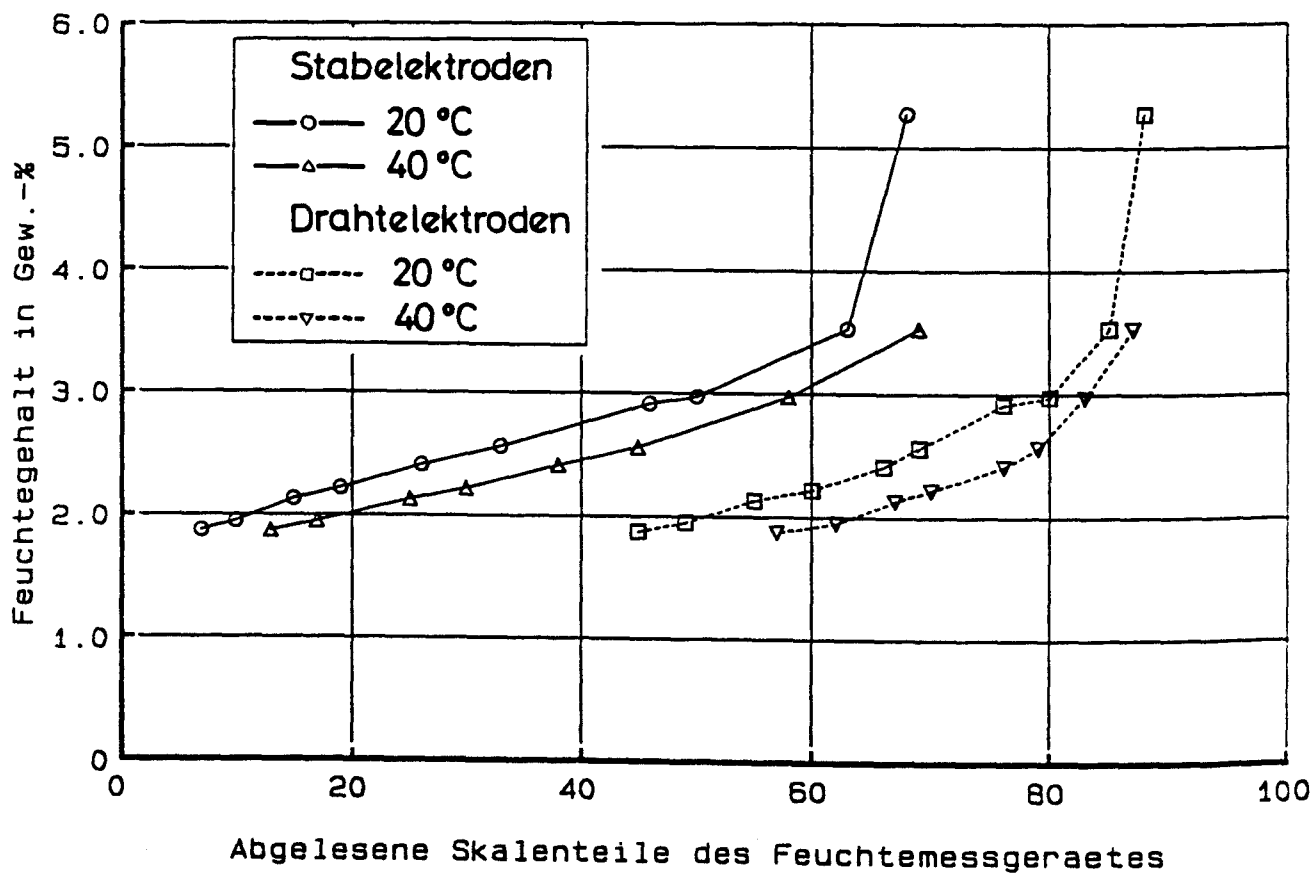


Bild 4.7.2 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand I, Eichkörper b)

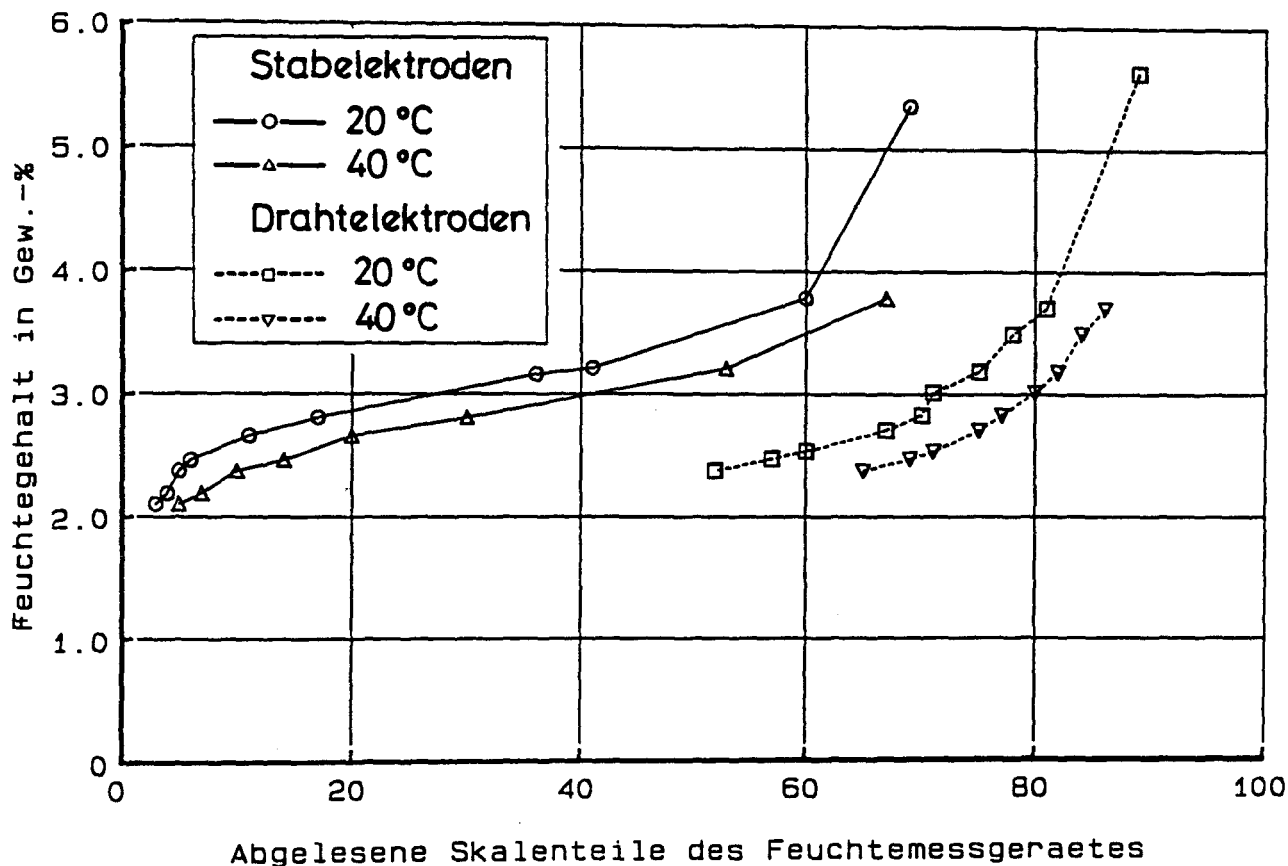


Bild 4.7.3 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand II, Eichkörper a)

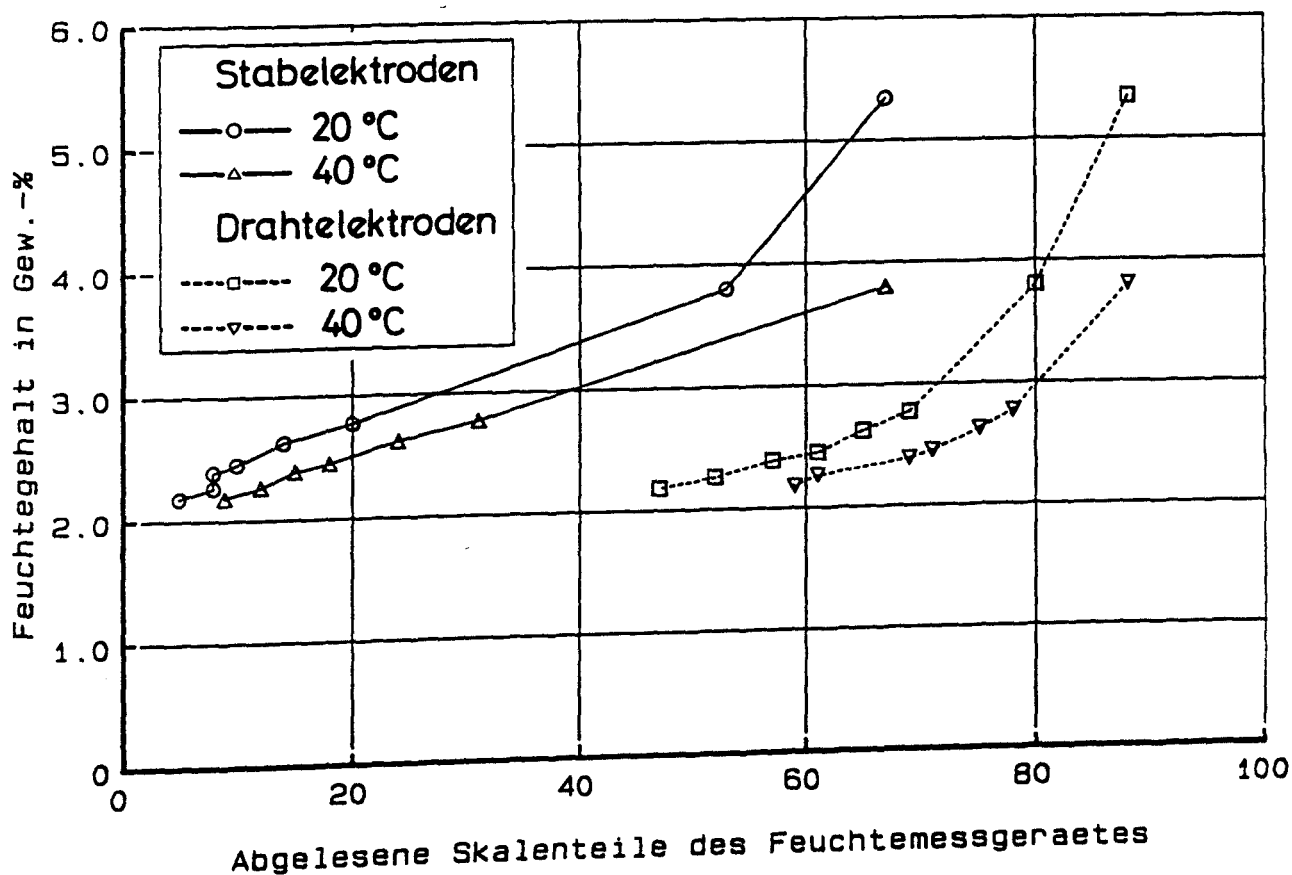


Bild 4.7.4 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand II, Eichkörper b)

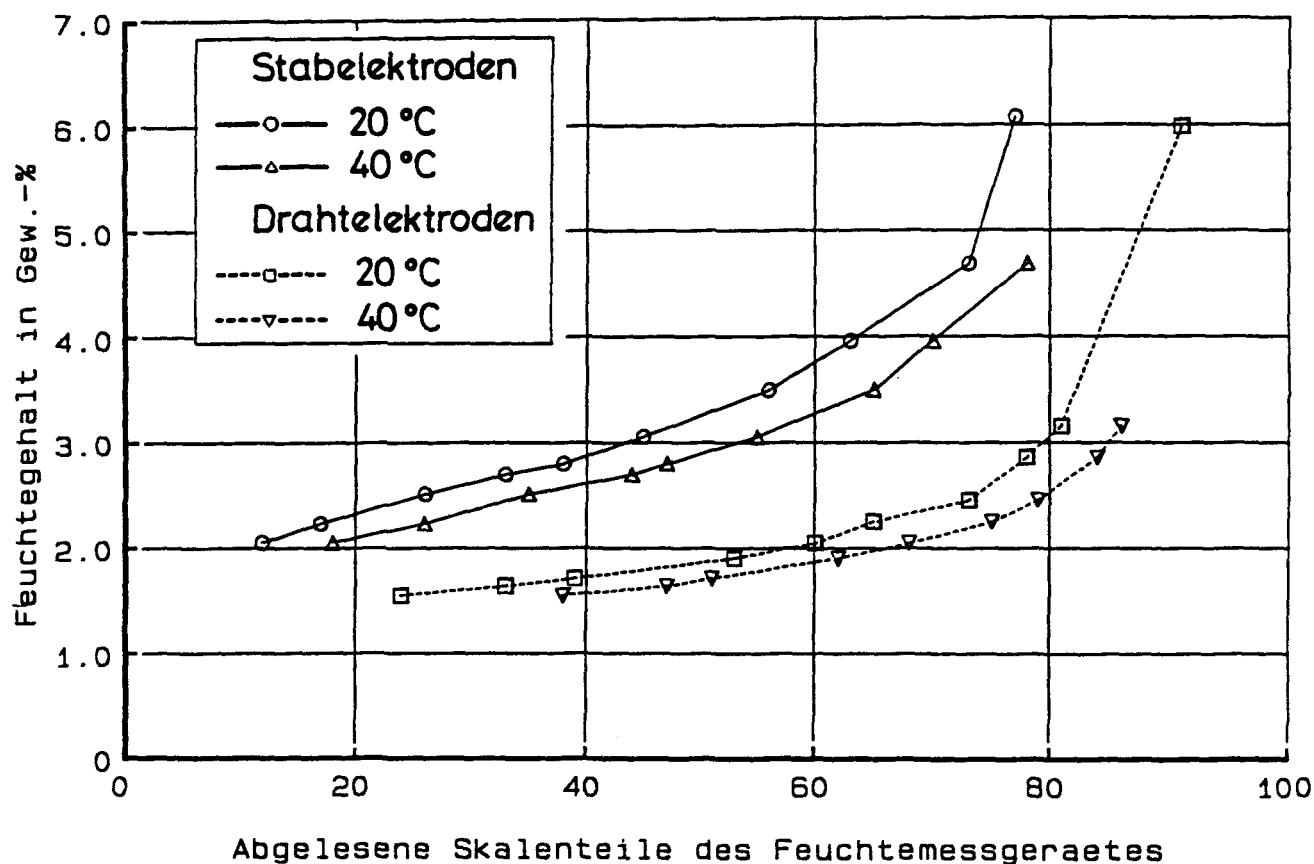


Bild 4.7.5 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand III, Eichkörper a)

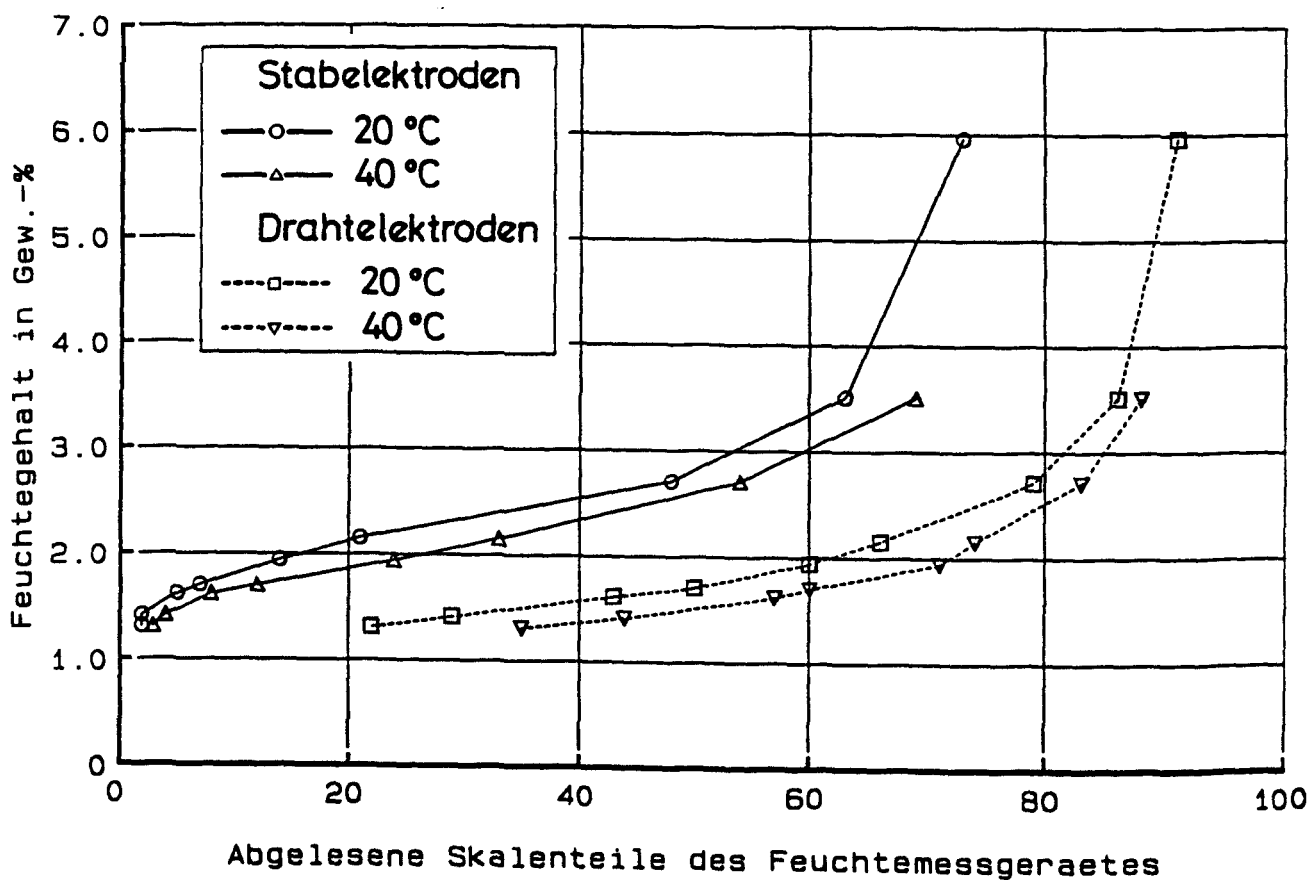
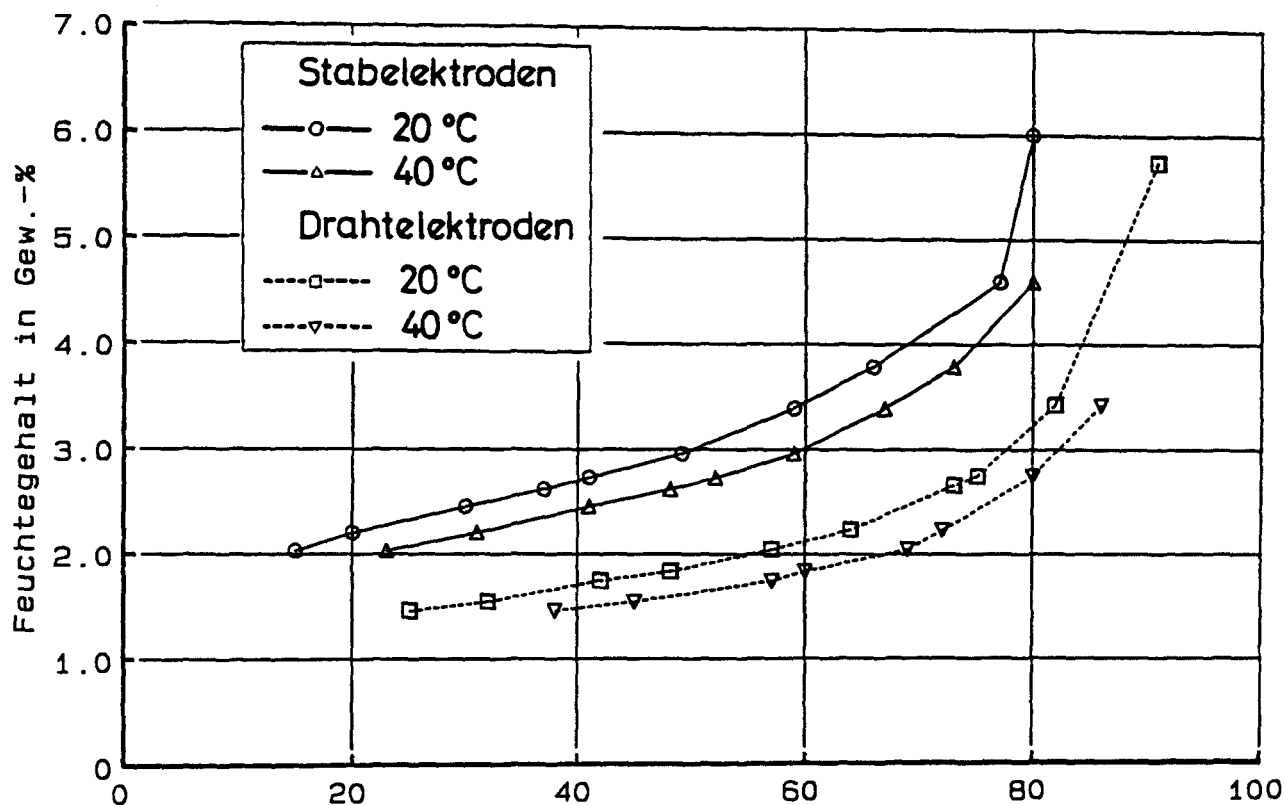
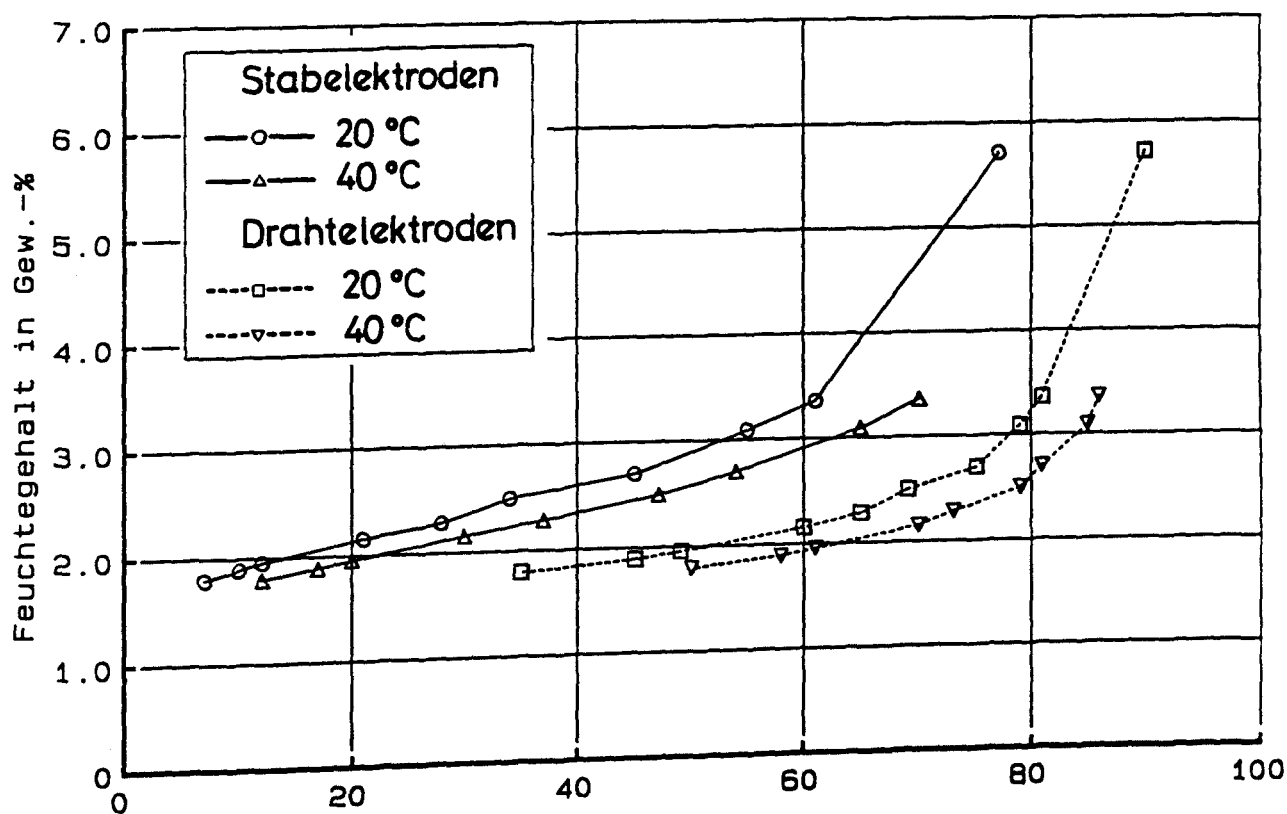


Bild 4.7.6 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand III, Eichkörper b)



Abgelesene Skalenteile des Feuchtemessgeraetes

Bild 4.7.7 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand IV, Eichkörper a)



Abgelesene Skalenteile des Feuchtemessgeraetes

Bild 4.7.8 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand IV, Eichkörper b)

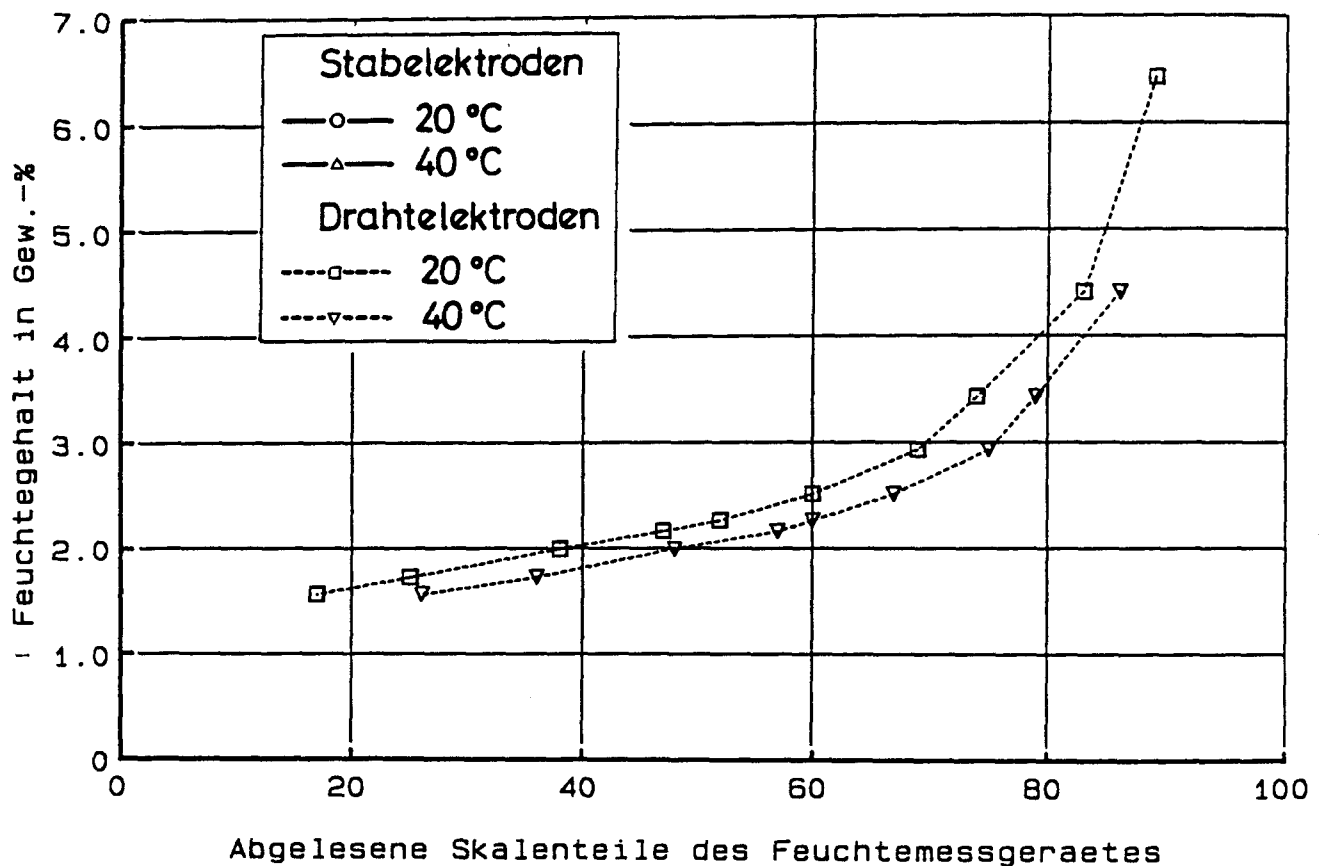


Bild 4.7.9 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand V, Eichkörper a)

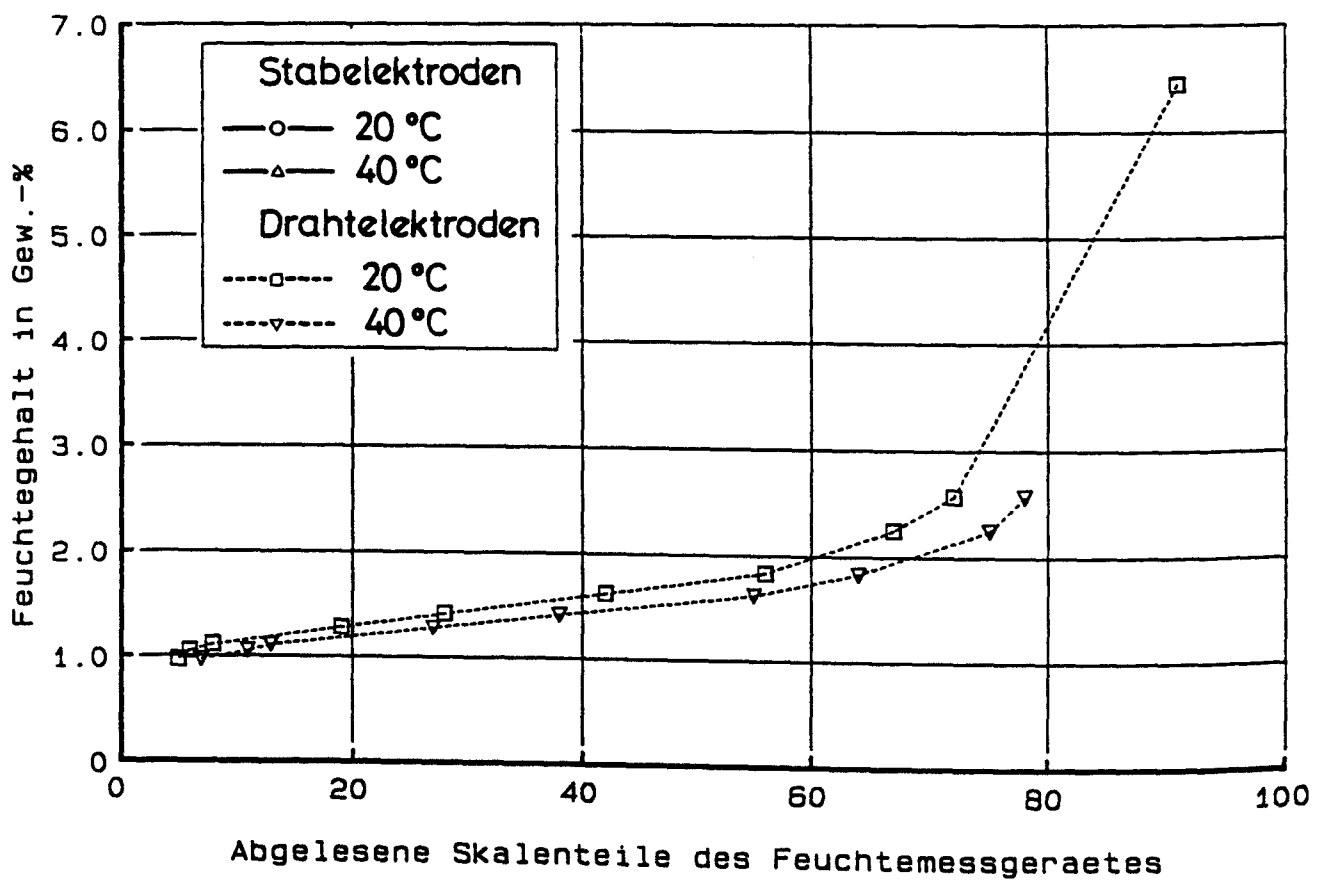


Bild 4.7.10 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand V, Eichkörper b)

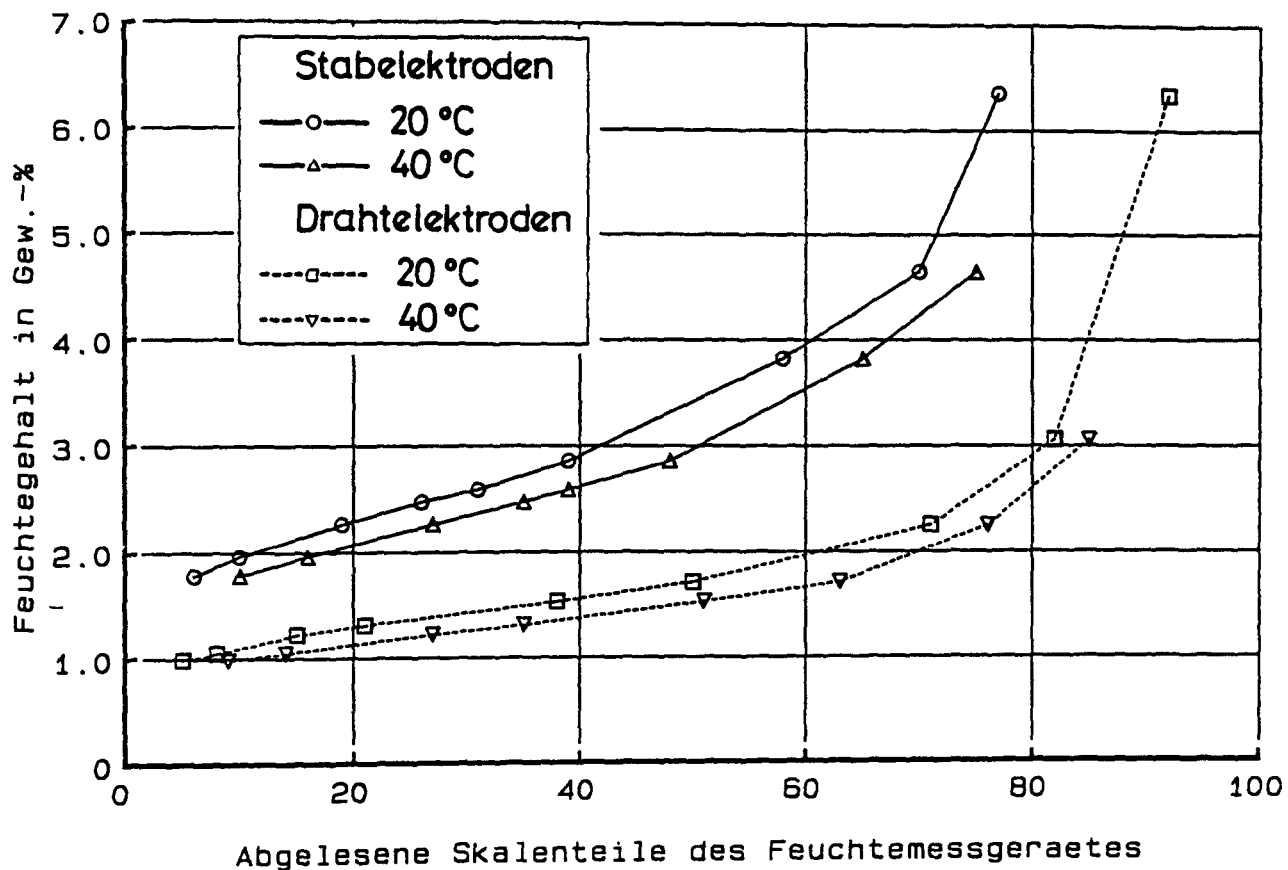


Bild 4.7.11 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand VI, Eichkörper a)

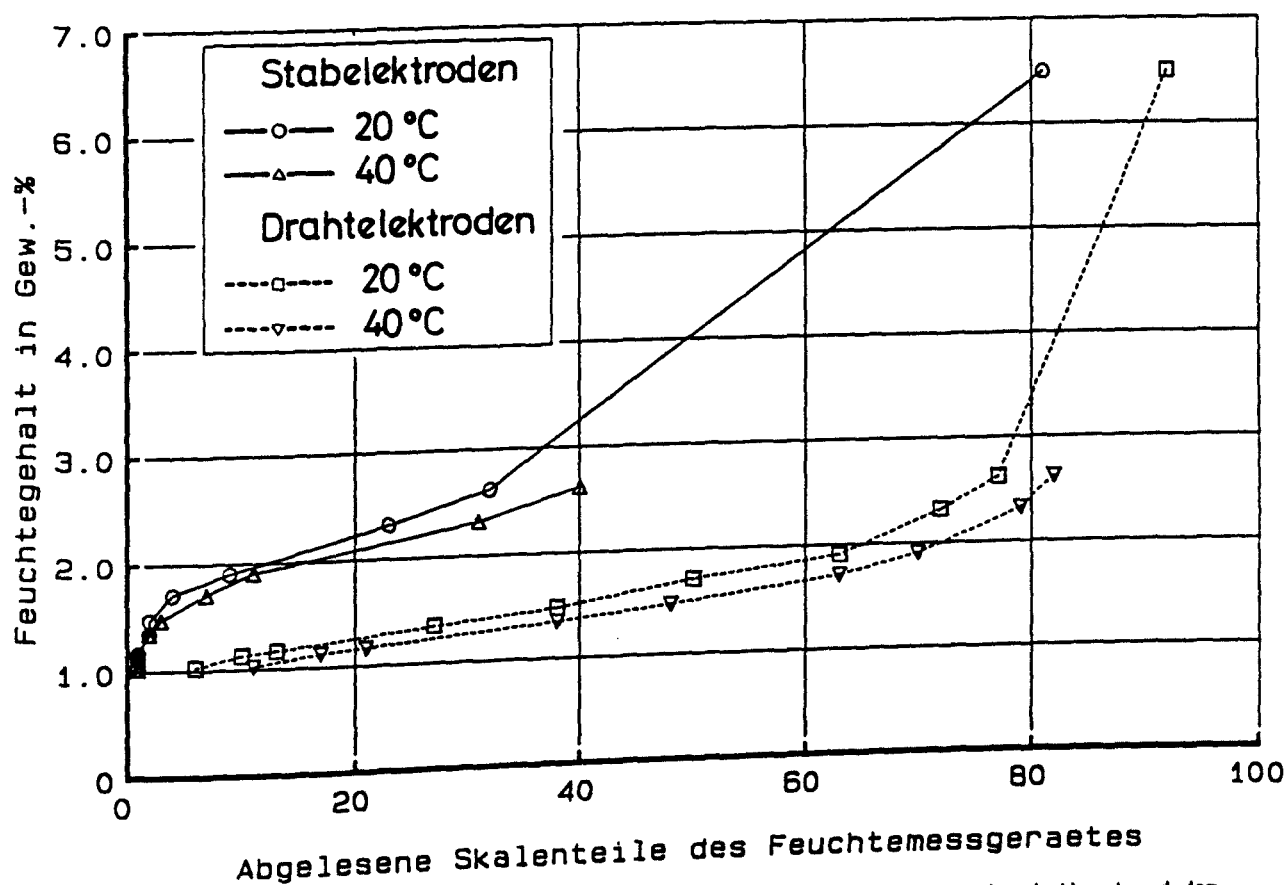


Bild 4.7.12 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand VI, Eichkörper b)

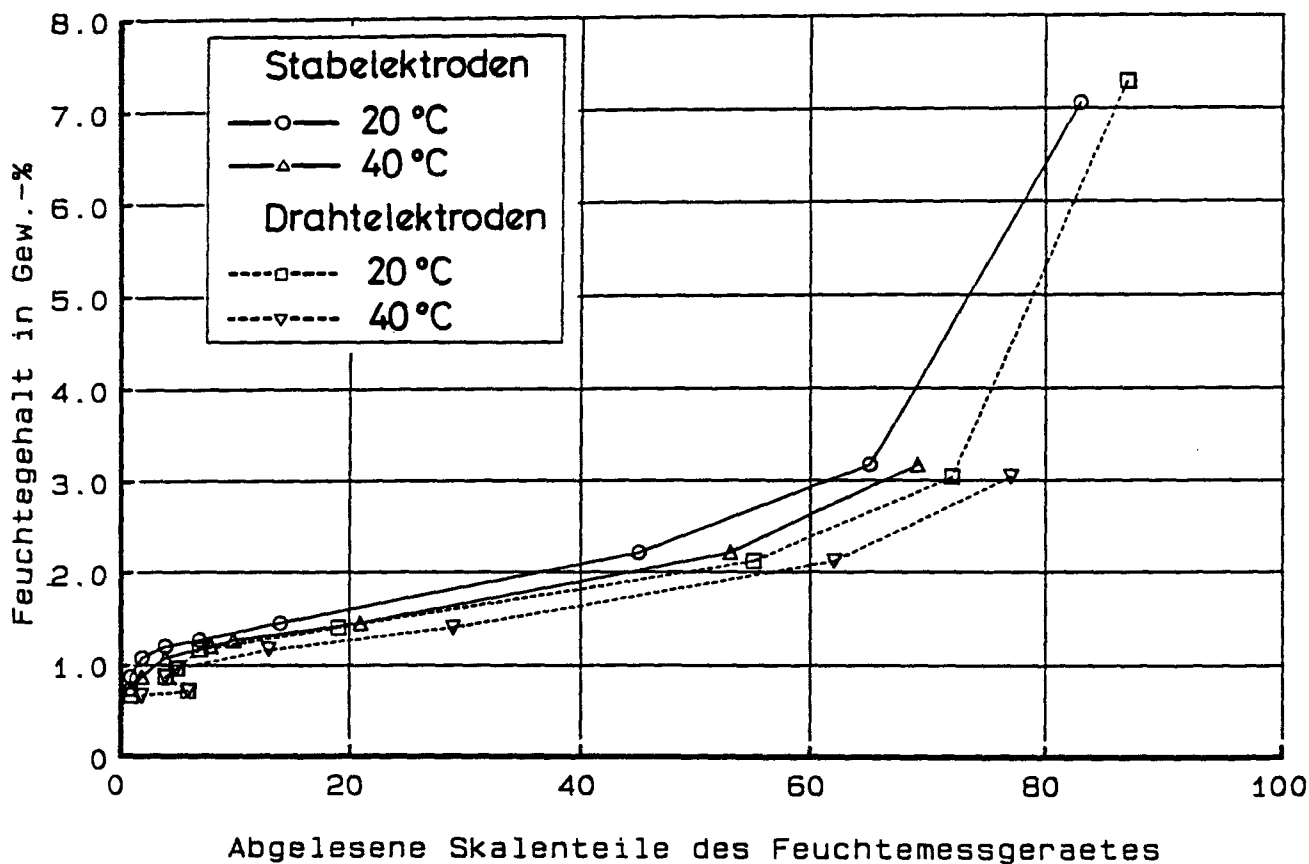


Bild 4.7.13 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand VII, Eichkörper a)

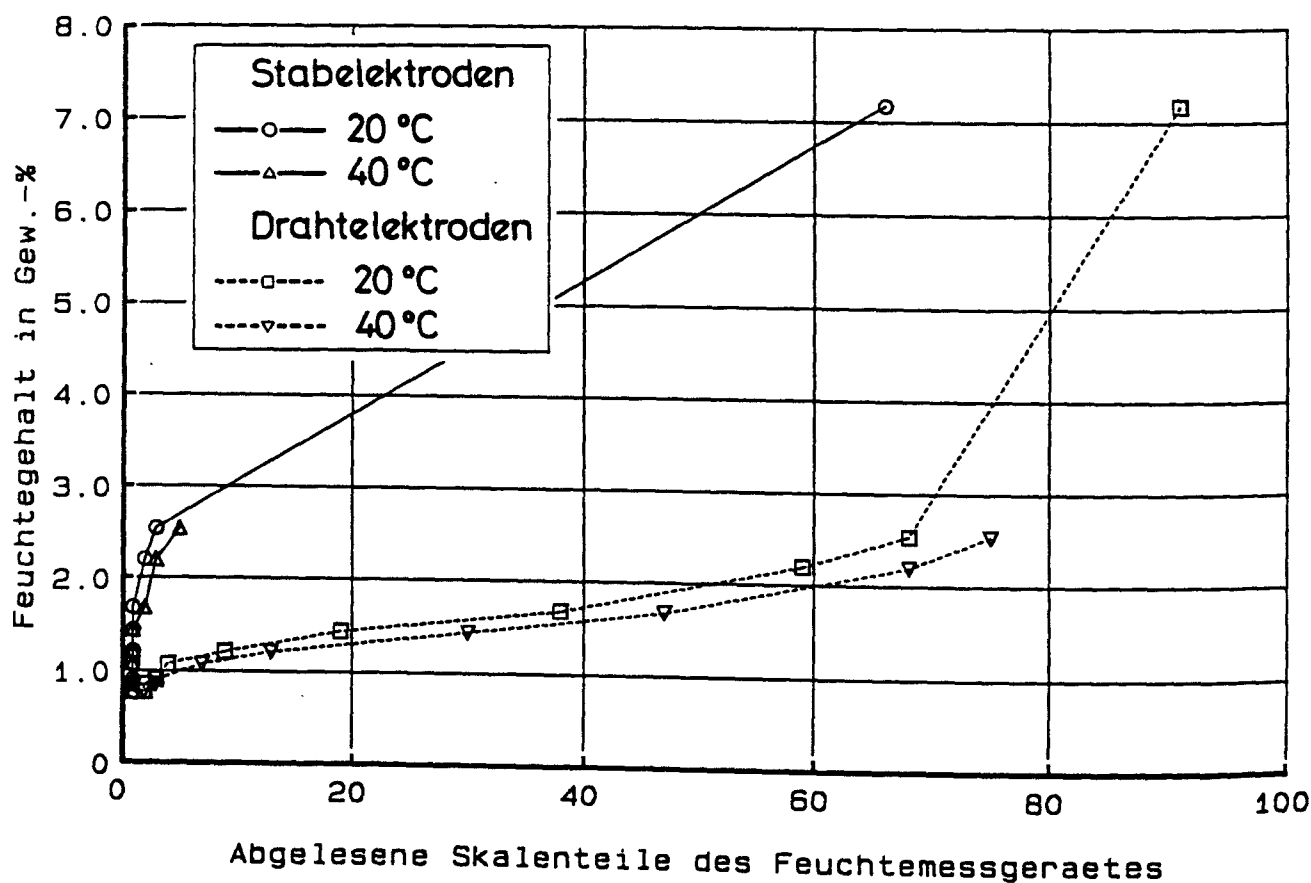


Bild 4.7.14 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand VII, Eichkörper b)

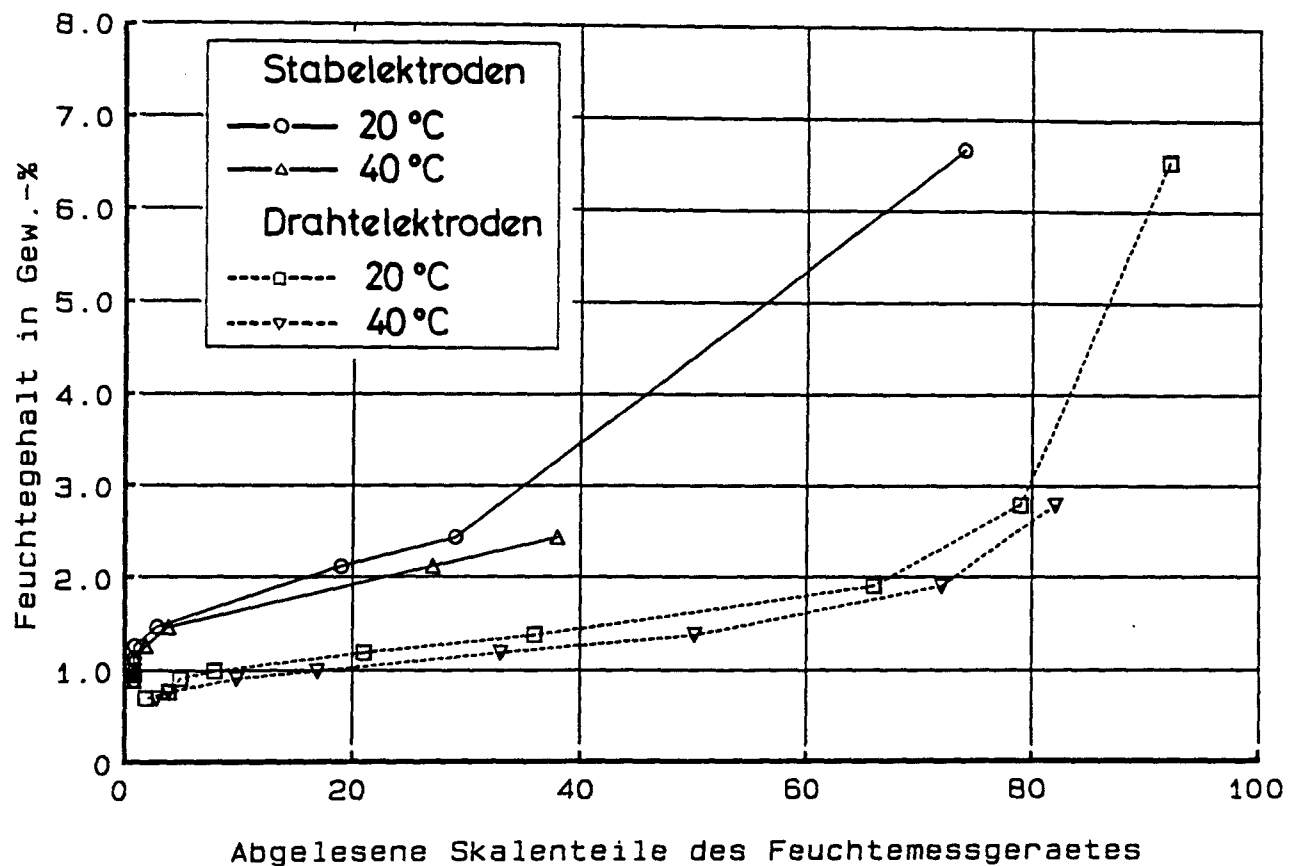


Bild 4.7.15 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand VIII, Eichkörper a)

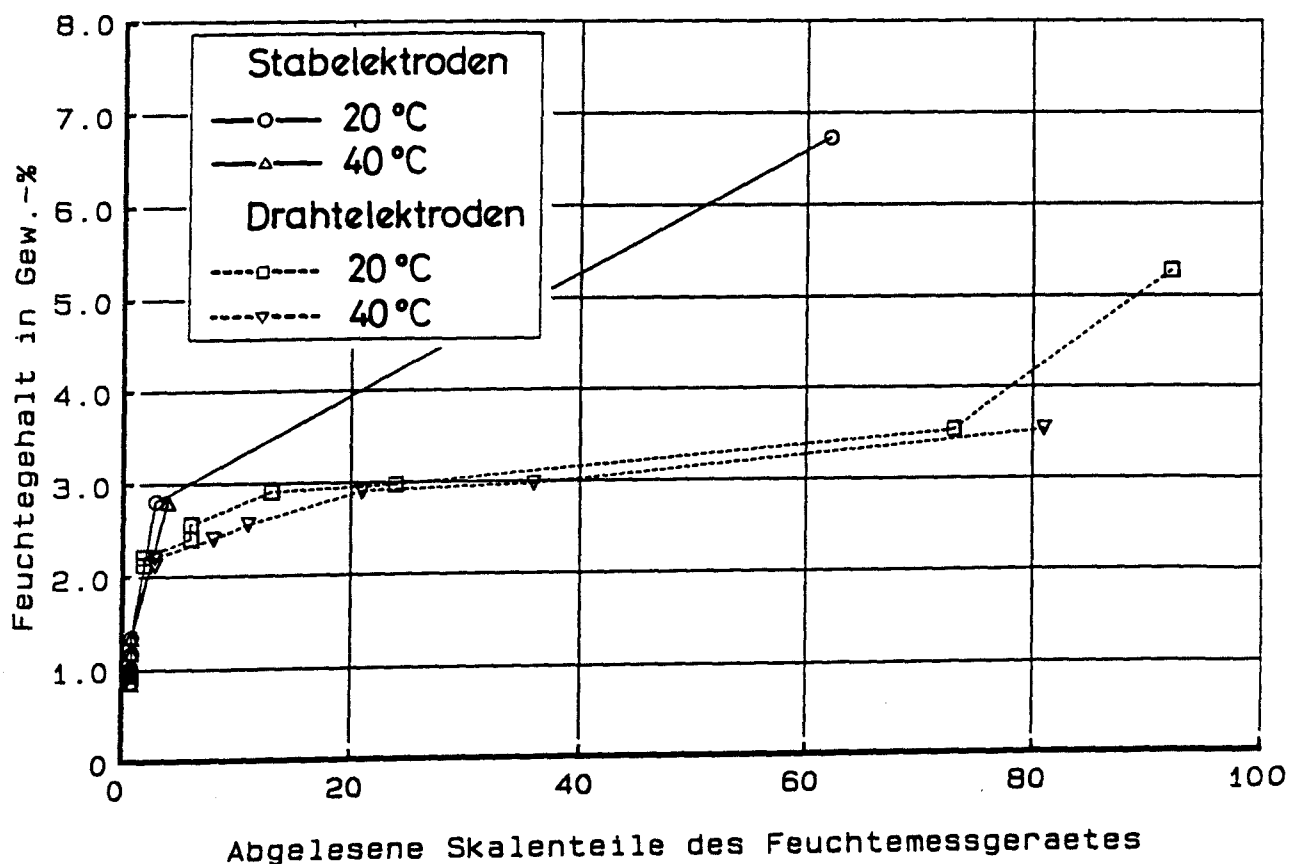
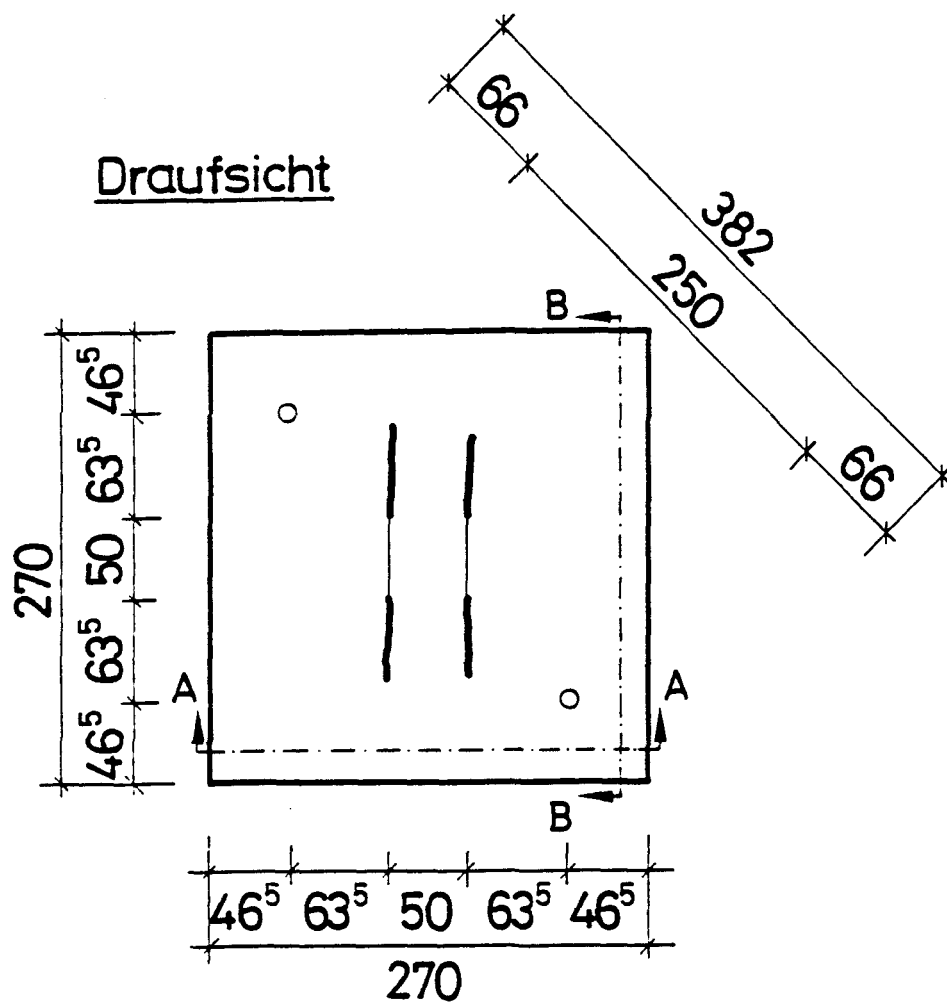
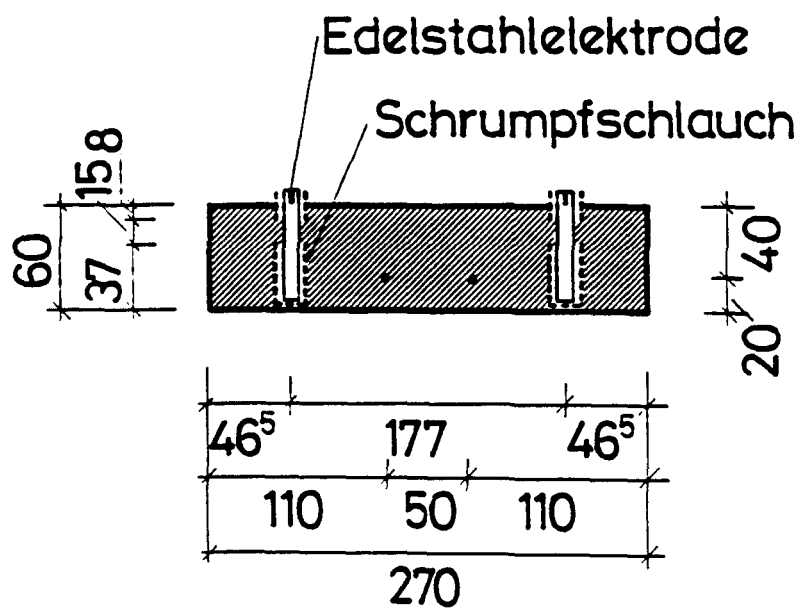


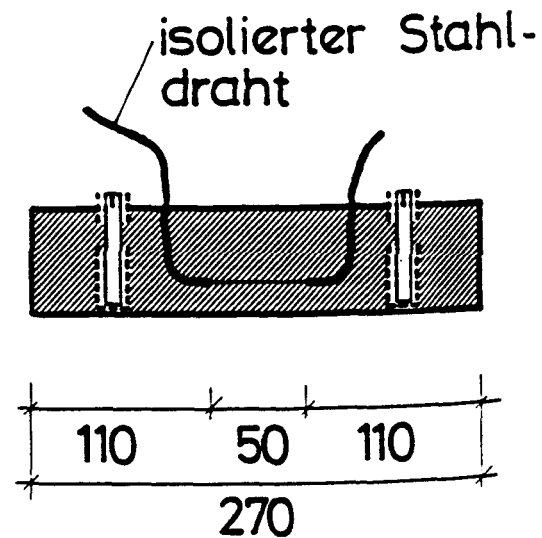
Bild 4.7.16 : Zusammenhang zwischen dem auf dem Feuchtemeßgerät abgelesenen elektrischen Leitwert und dem Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Temperatur und der Geometrie der Elektrodenform und -anordnung. (Eichkurven für Wand VIII, Eichkörper b)



Schnitt A-A



Schnitt B-B



alle Maße in mm

Bild 4.7.17 : Skizze der Eichkörper. (Abmessungen, Lage der Elektroden)

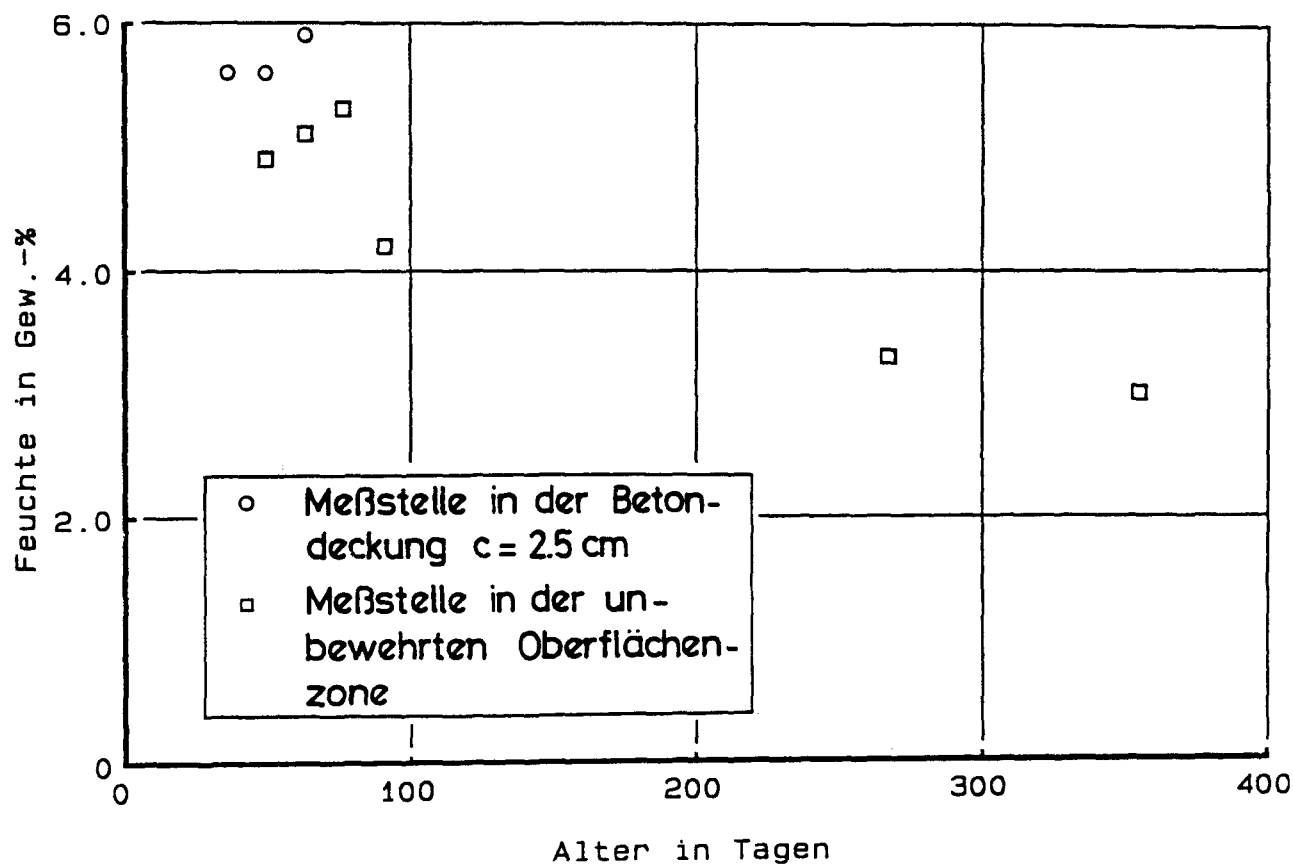


Bild 4.7.18 : Zeitliche Entwicklung des Feuchtegehalts von Wand II in 5 mm Entfernung von der Wandoberfläche. (beide Wandseiten, Messung mittels der Drahtelektroden)

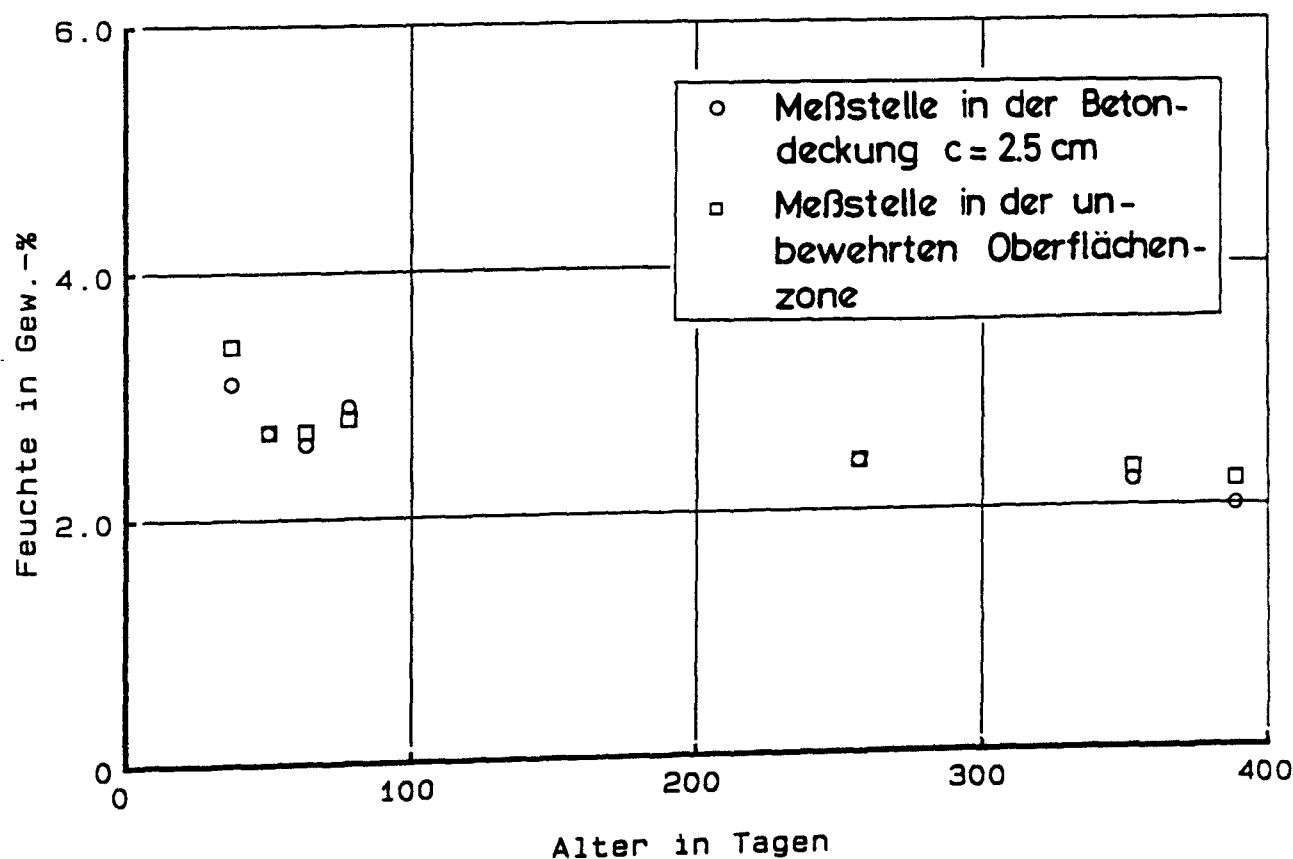


Bild 4.7.19 : Zeitliche Entwicklung des Feuchtegehalts von Wand III in 5 mm Entfernung von der Wandoberfläche. (beide Wandseiten, Messung mittels der Drahtelektroden)

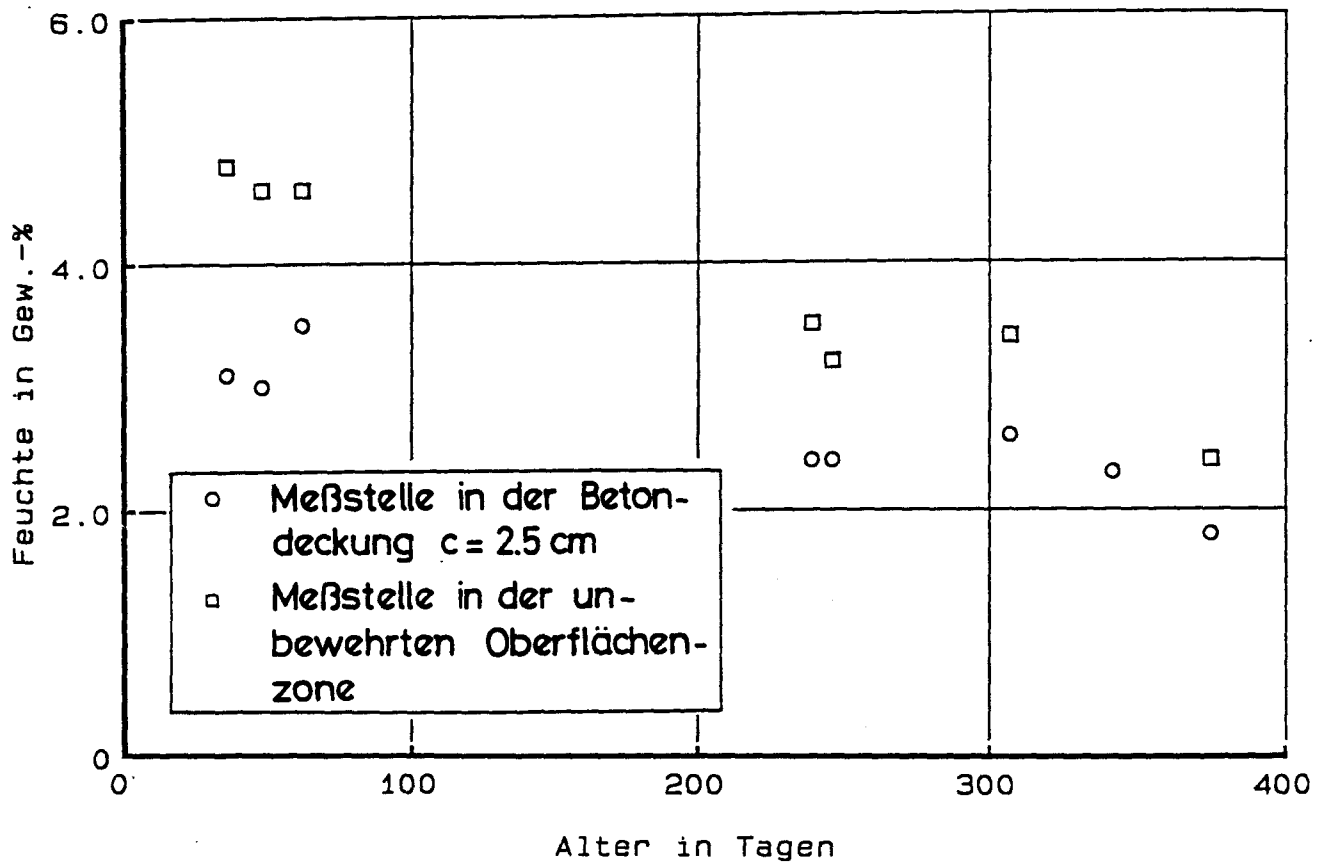


Bild 4.7.20 : Zeitliche Entwicklung des Feuchtegehalts von Wand IV in 5 mm Entfernung von der Wandoberfläche. (beide Wandseiten, Messung mittels der Drahtelektroden)

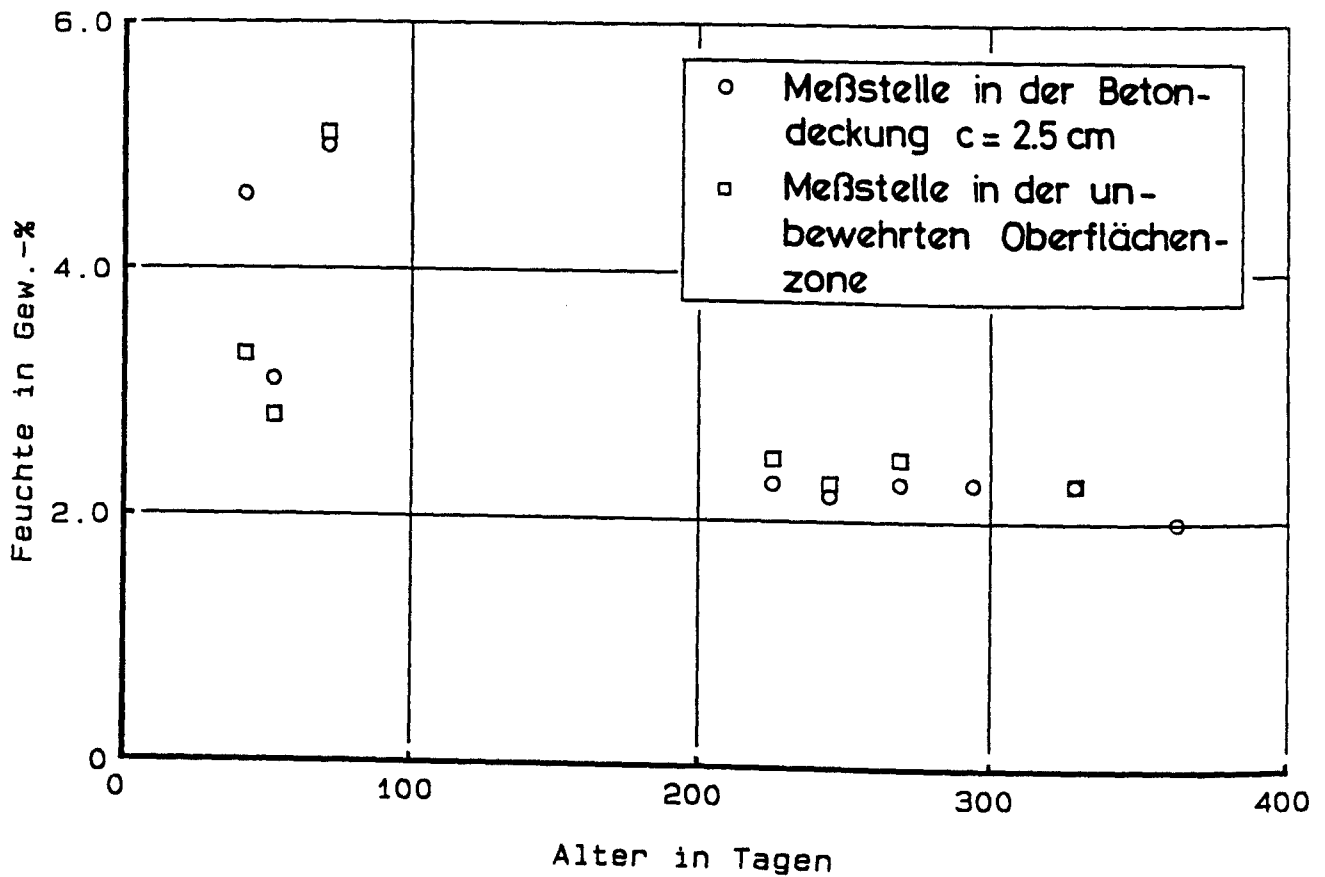


Bild 4.7.21 : Zeitliche Entwicklung des Feuchtegehalts von Wand V in 5 mm Entfernung von der Wandoberfläche. (beide Wandseiten, Messung mittels der Drahtelektroden)

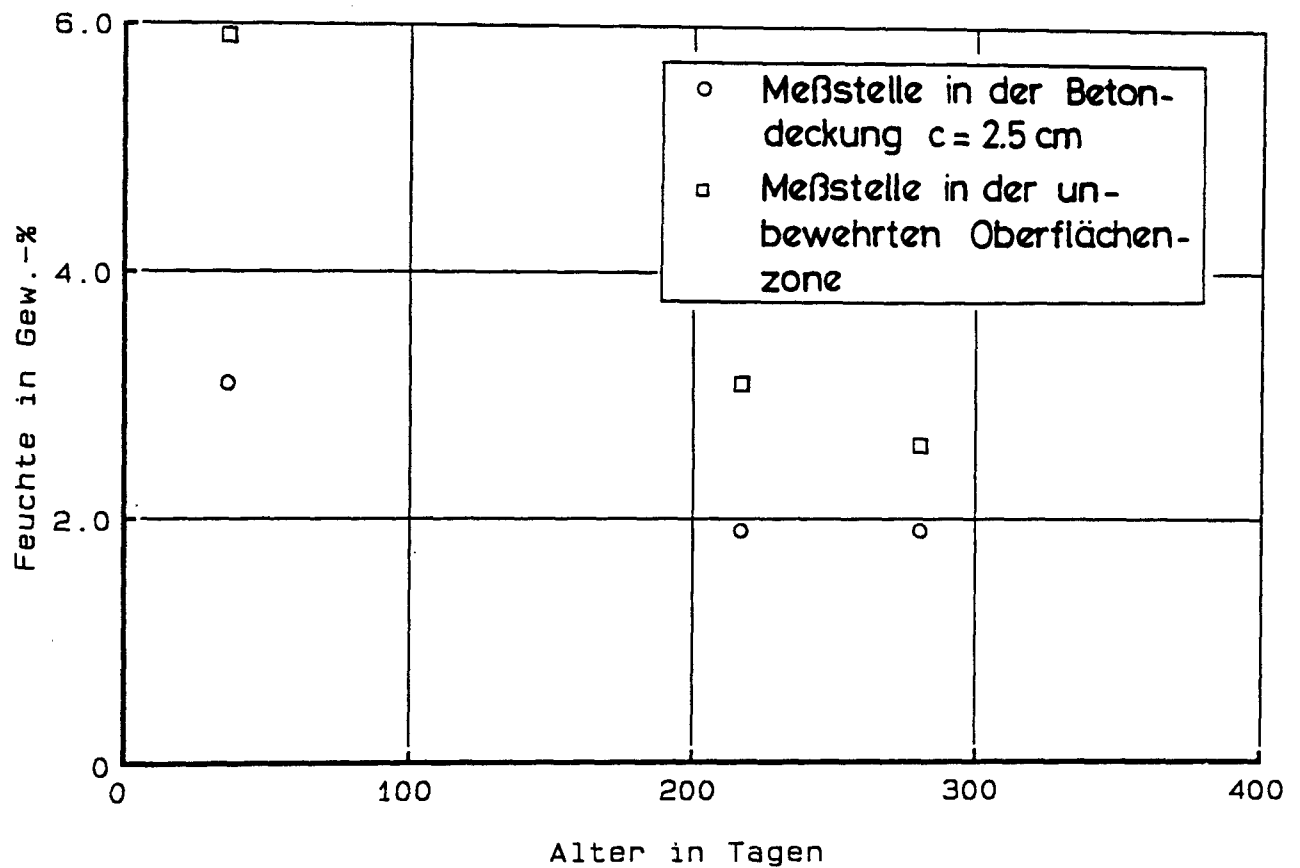


Bild 4.7.22 : Zeitliche Entwicklung des Feuchtegehalts von Wand VI in 5 mm Entfernung von der Wandoberfläche. (beide Wandseiten, Messung mittels der Drahtelektroden)

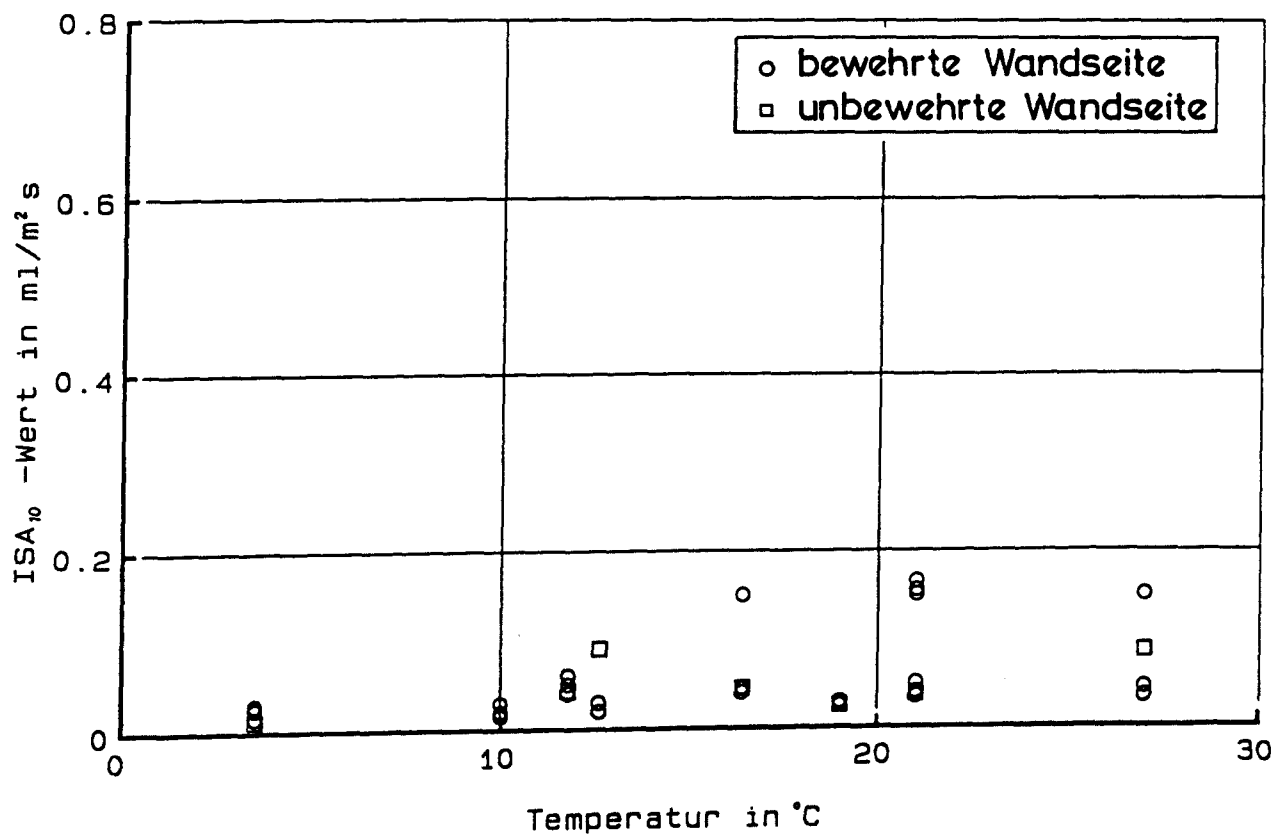


Bild 4.7.23 : Abhängigkeit zwischen dem ISA₁₀-Wert und der Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Messung für Wand I.

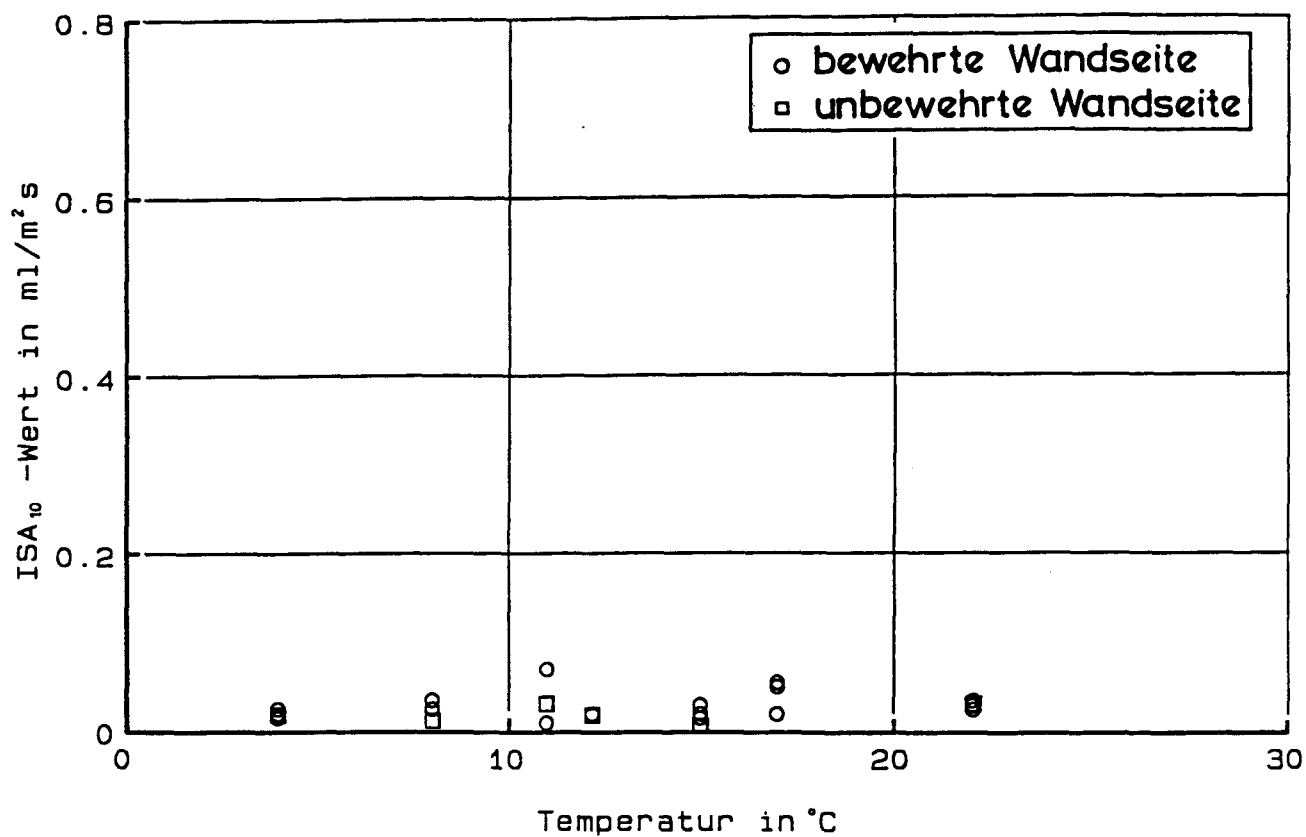


Bild 4.7.24 : Abhängigkeit zwischen dem ISA_{10} -Wert und der Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Messung für Wand II.

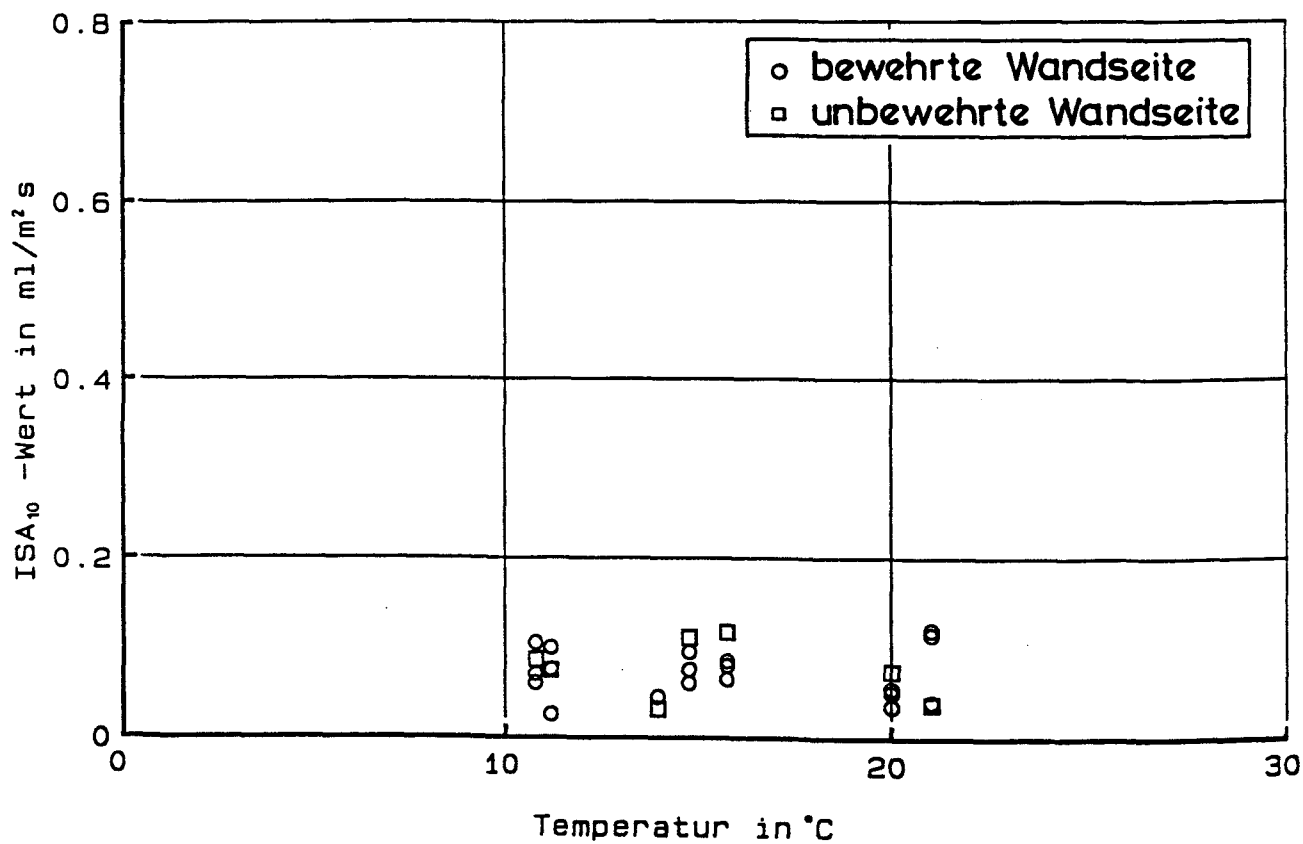


Bild 4.7.25 : Abhängigkeit zwischen dem ISA_{10} -Wert und der Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Messung für Wand III.

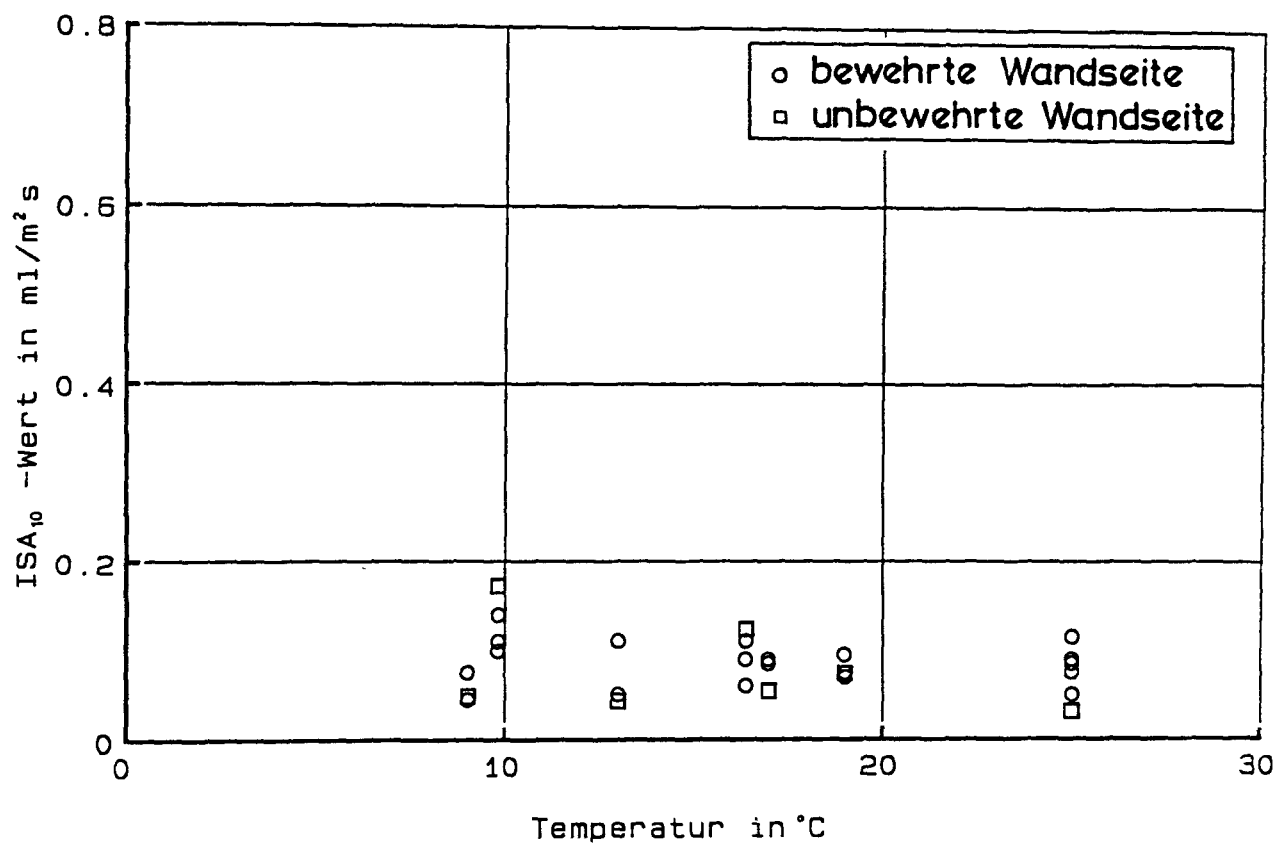


Bild 4.7.26 : Abhängigkeit zwischen dem ISA_{10} -Wert und der Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Messung für Wand IV.

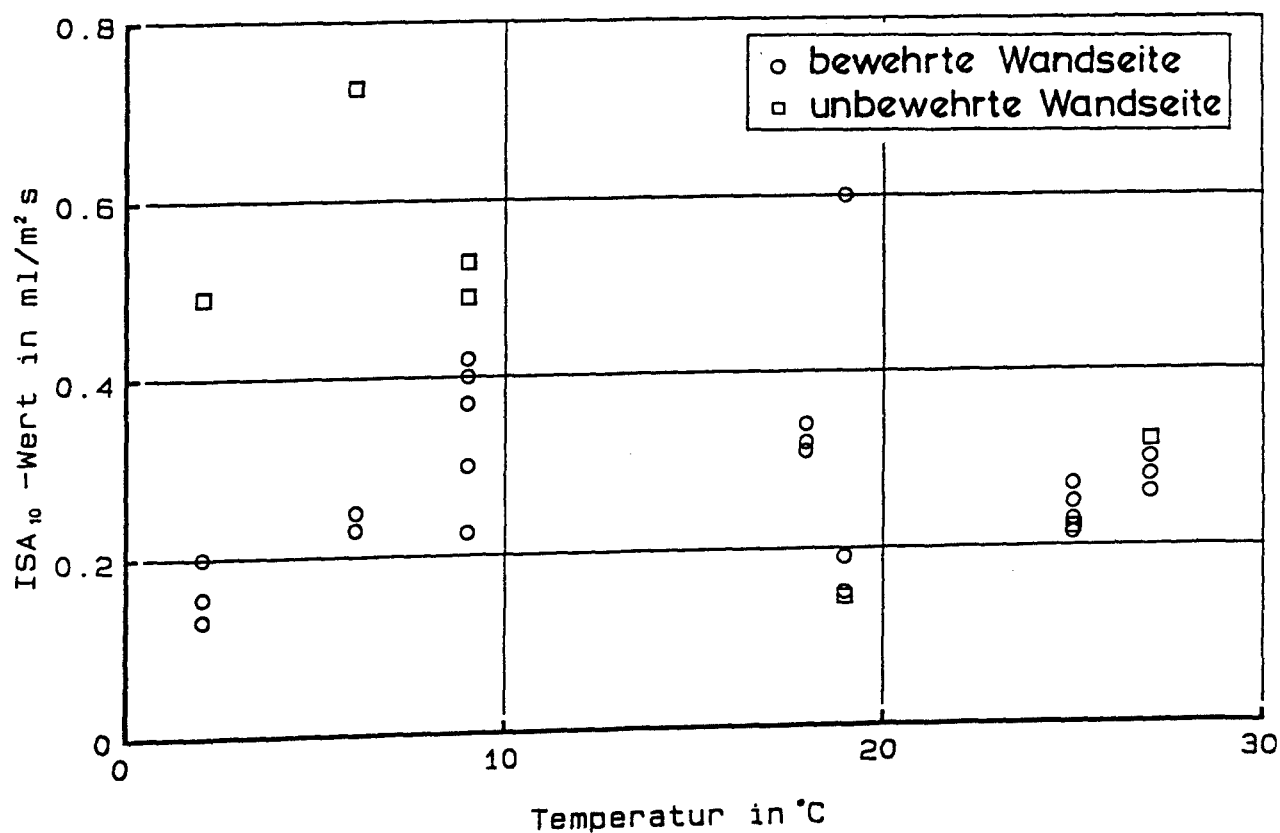


Bild 4.7.27 : Abhängigkeit zwischen dem ISA_{10} -Wert und der Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Messung für Wand V.

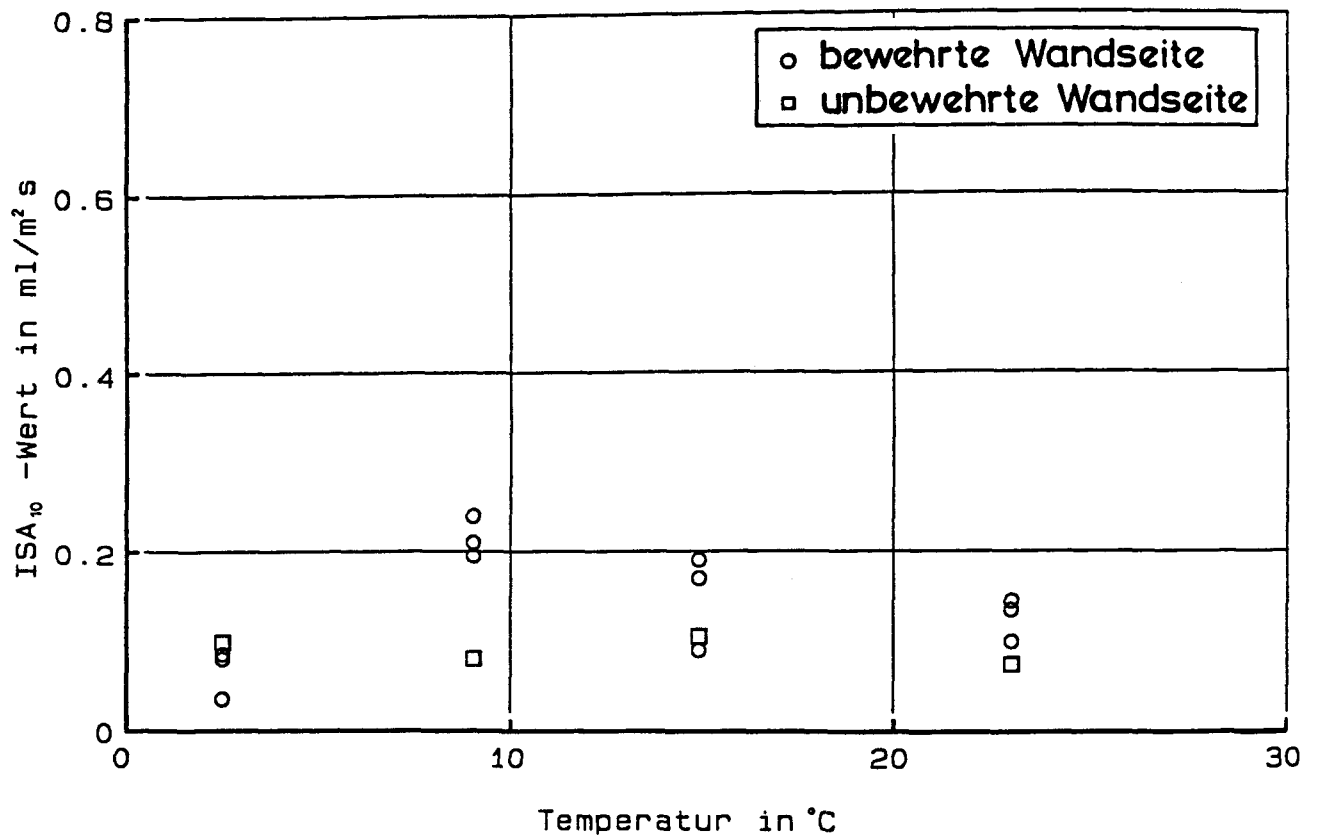


Bild 4.7.28 : Abhängigkeit zwischen dem ISA_{10} -Wert und der Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Messung für Wand VI.

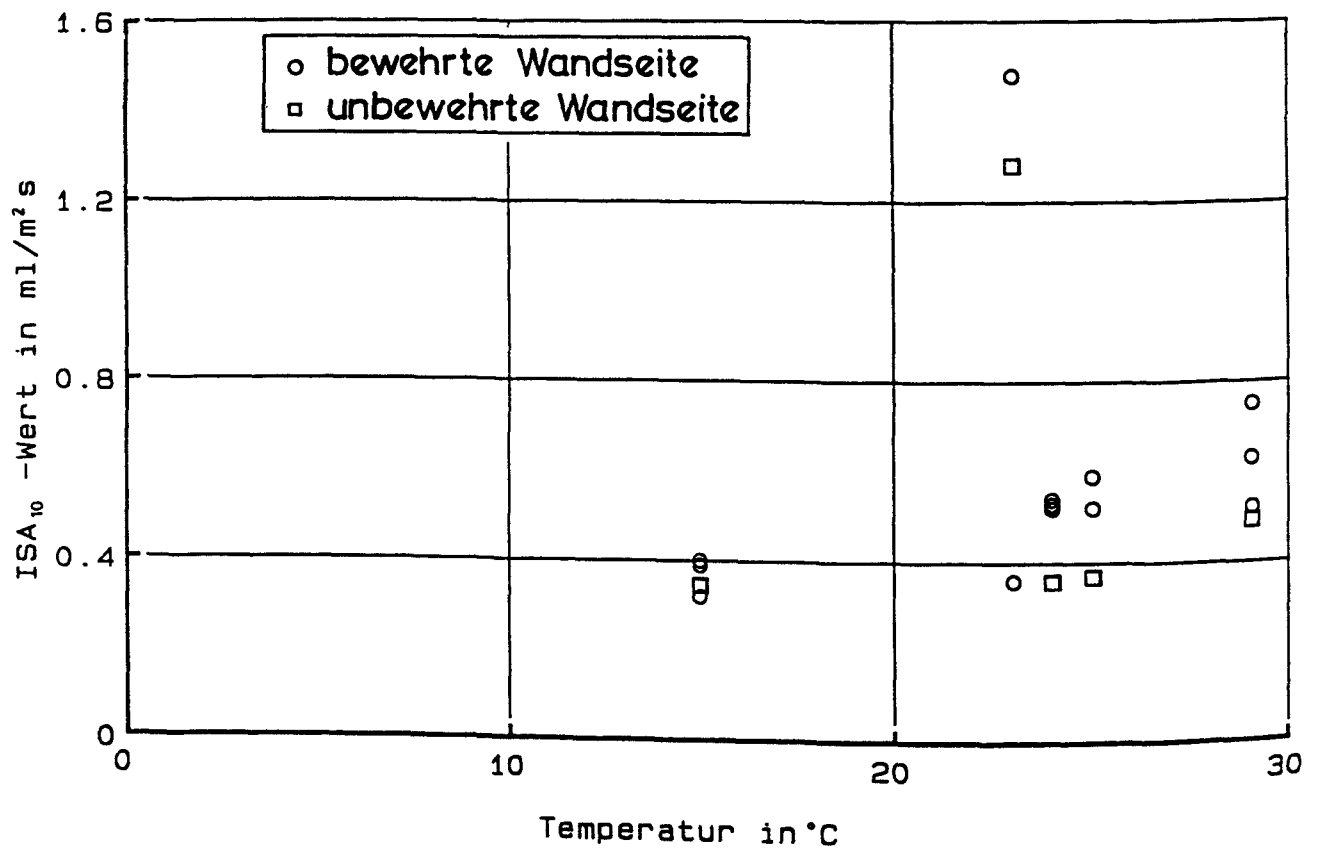


Bild 4.7.29 : Abhängigkeit zwischen dem ISA_{10} -Wert und der Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Messung für Wand VII.

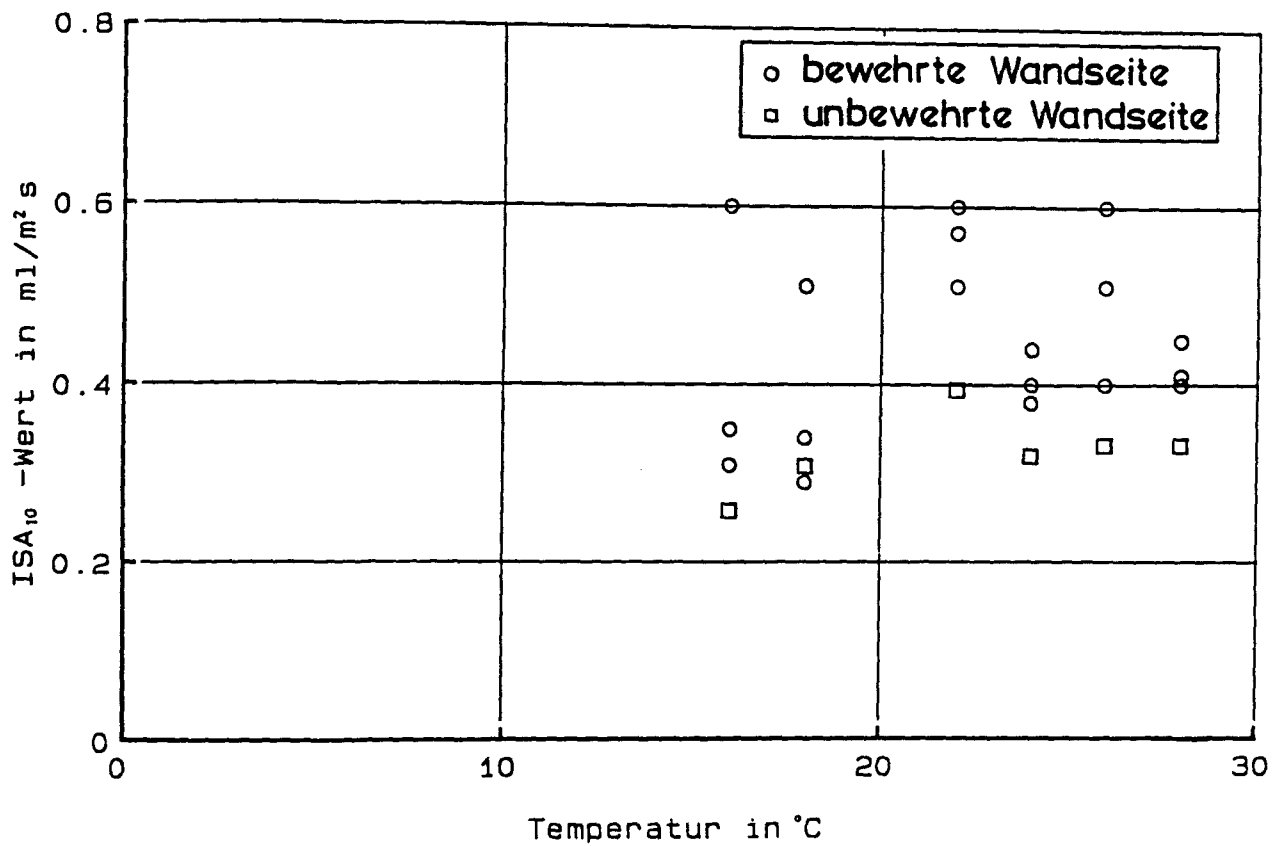


Bild 4.7.30 : Abhängigkeit zwischen dem ISA₁₀-Wert und der Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Messung für Wand VIII.

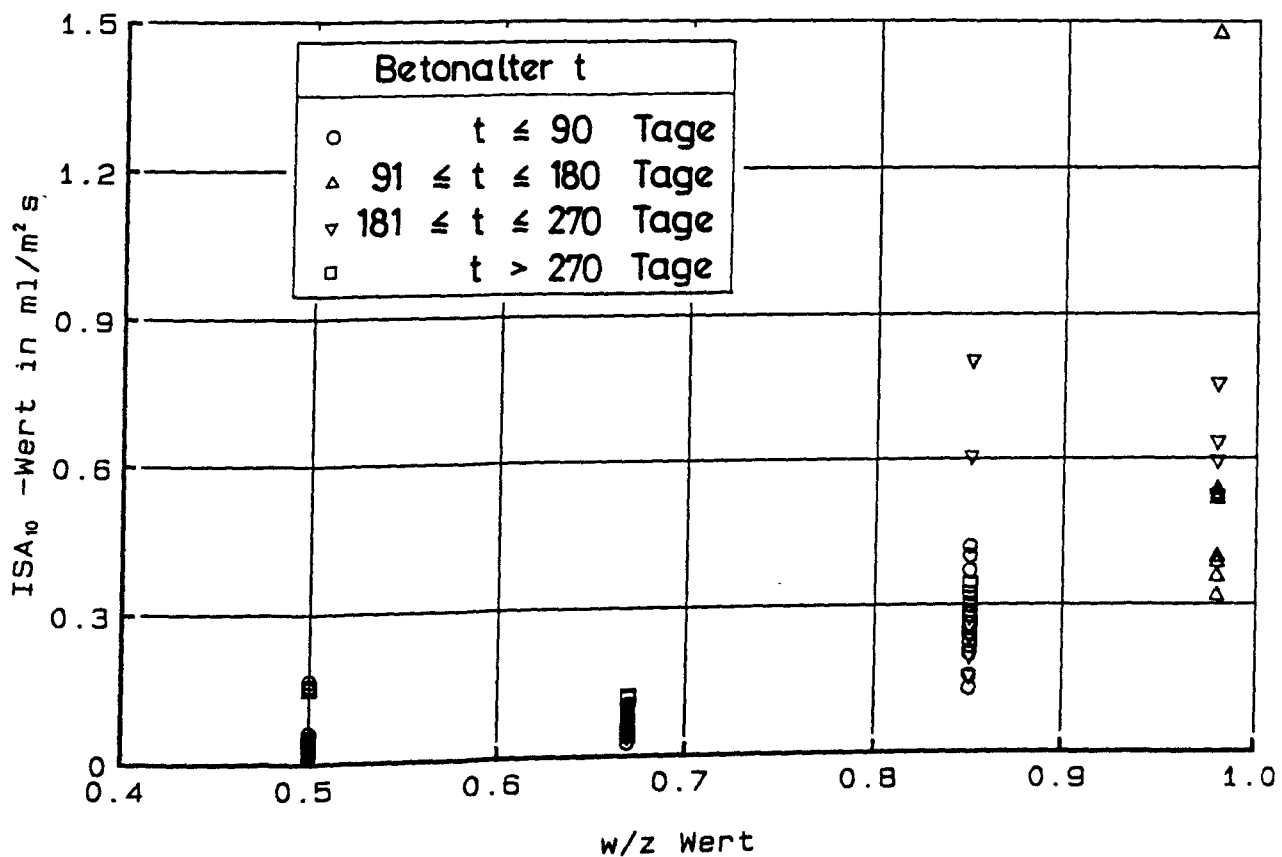


Bild 4.7.31 : Abhängigkeit des ISA₁₀-Wertes vom w/z-Wert. (Messungen auf der bewehrten Wandseite nicht nachbehandelter Wände)

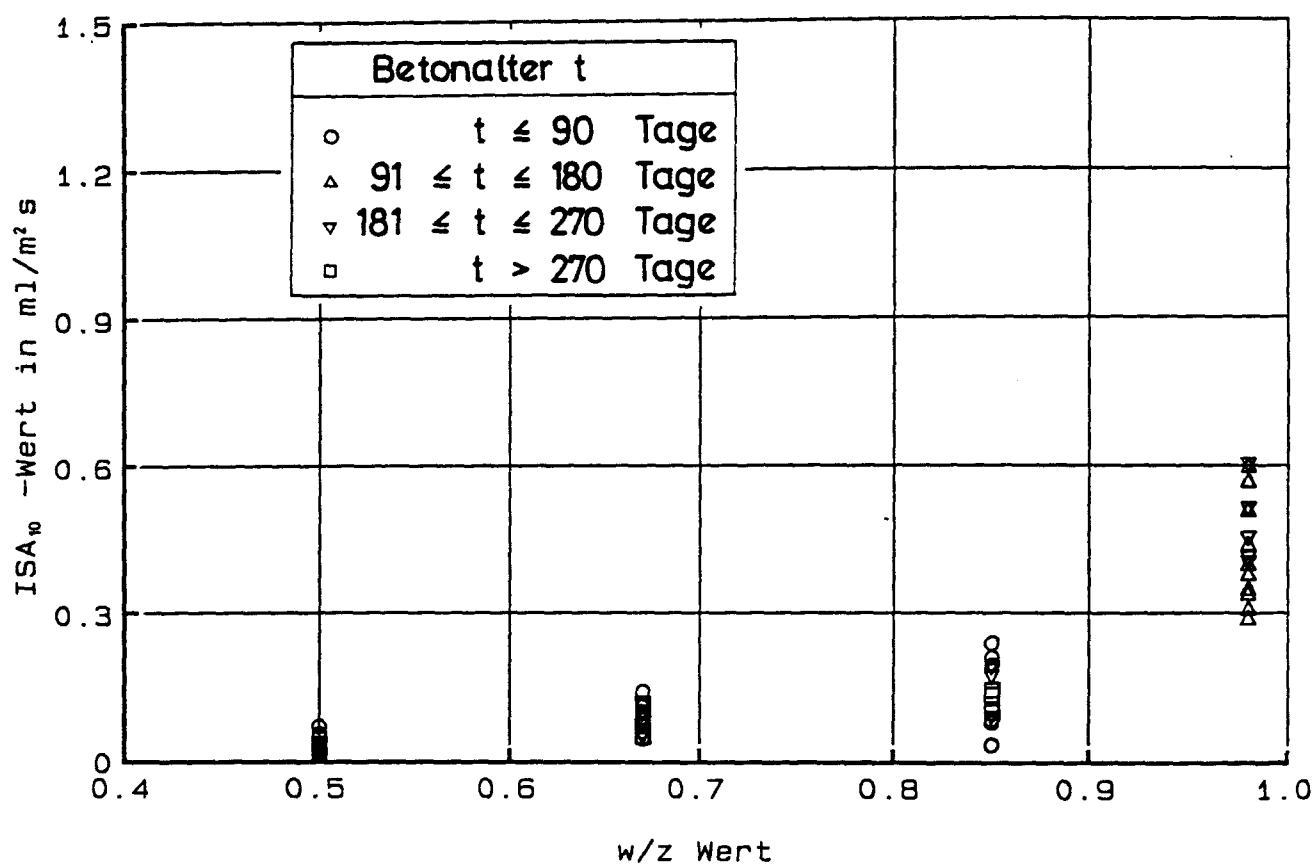


Bild 4.7.32 : Abhängigkeit des ISA₁₀-Wertes vom w/z-Wert. (Messungen auf der bewehrten Wandseite nachbehandelter Wände)

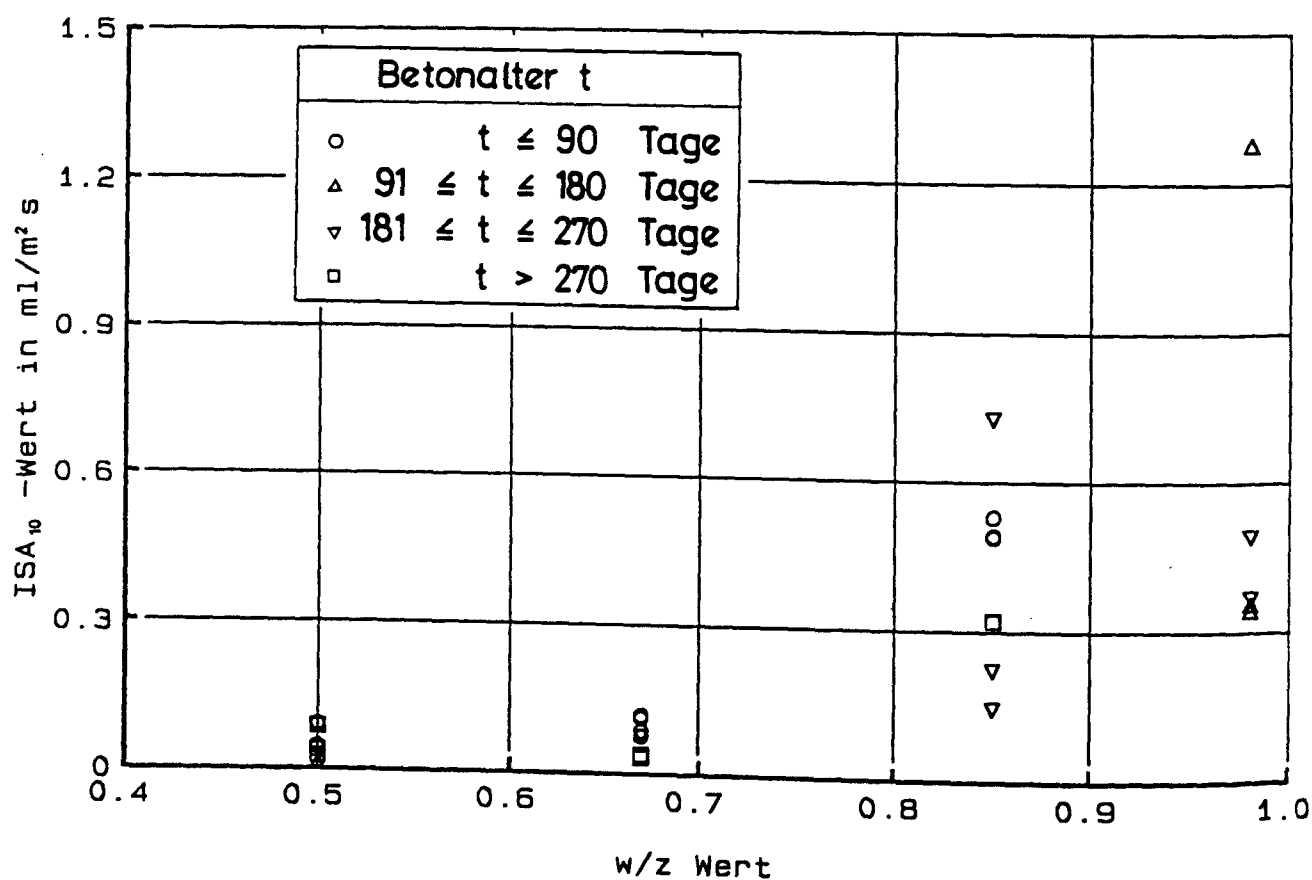


Bild 4.7.33 : Abhängigkeit des ISA₁₀-Wertes vom w/z-Wert. (Messungen auf der unbewehrten Wandseite nicht nachbehandelter Wände)

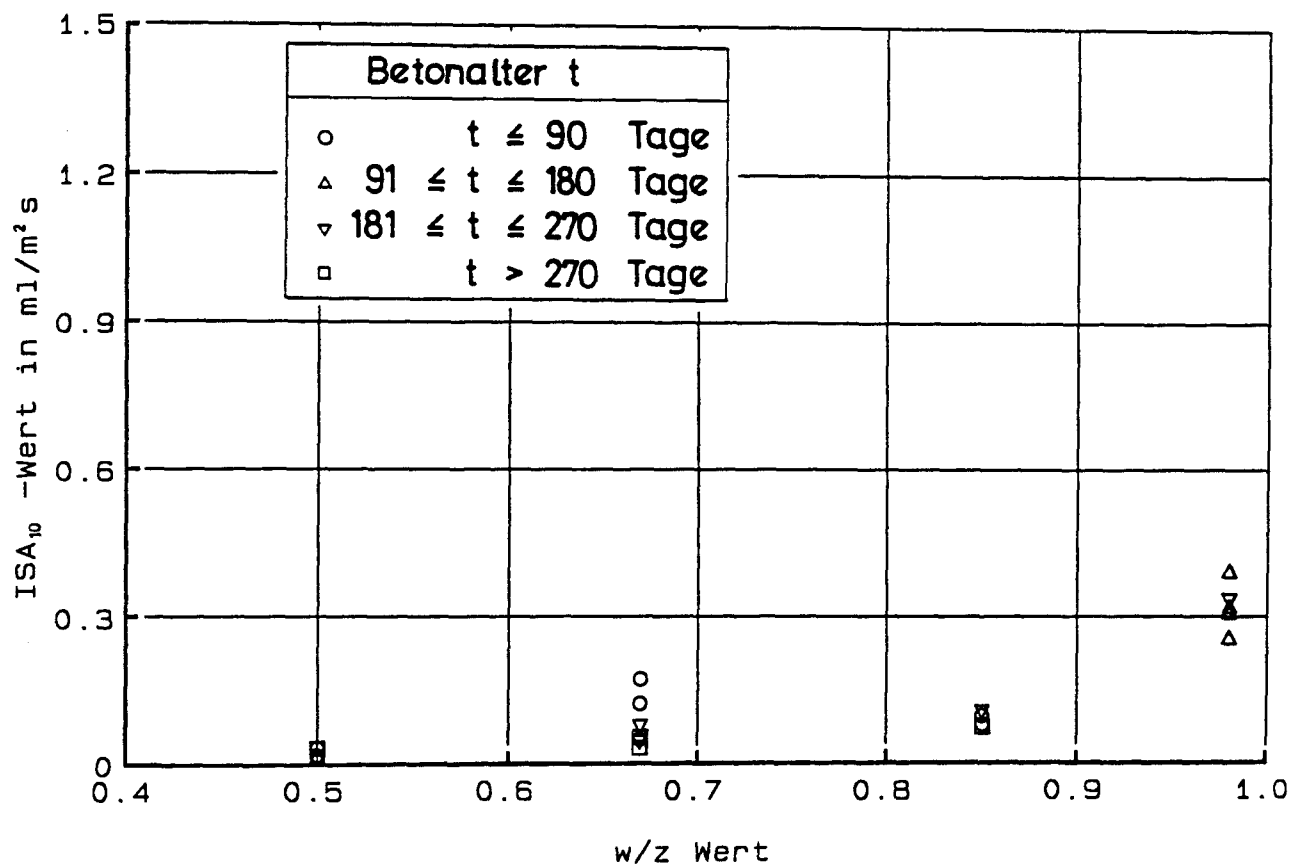


Bild 4.7.34 : Abhängigkeit des ISA_{10} -Wertes vom w/z-Wert. (Messungen auf der unbewehrten Wandseite nachbehandelter Wände)

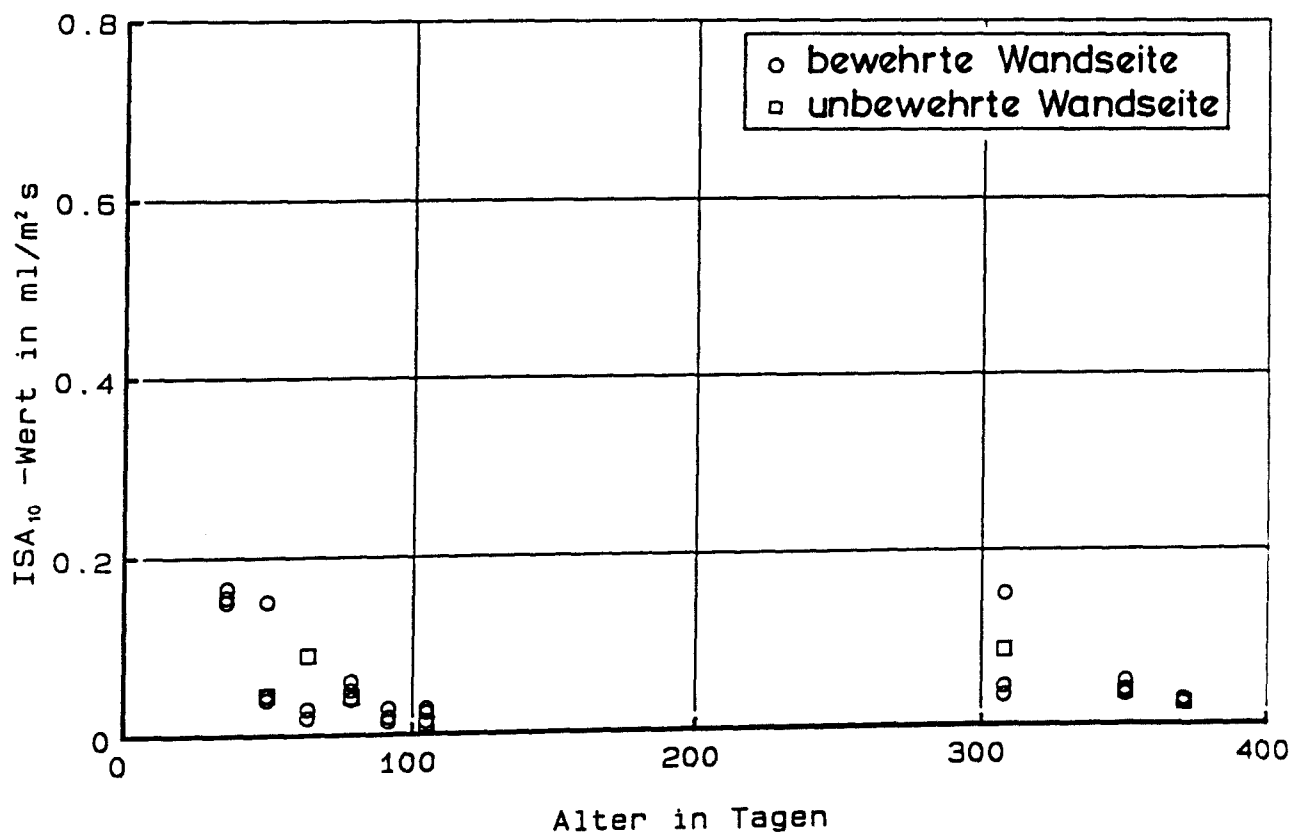


Bild 4.7.35 : Zeitliche Entwicklung des ISA_{10} -Wertes für Wand I. (Messungen auf beiden Wandseiten)

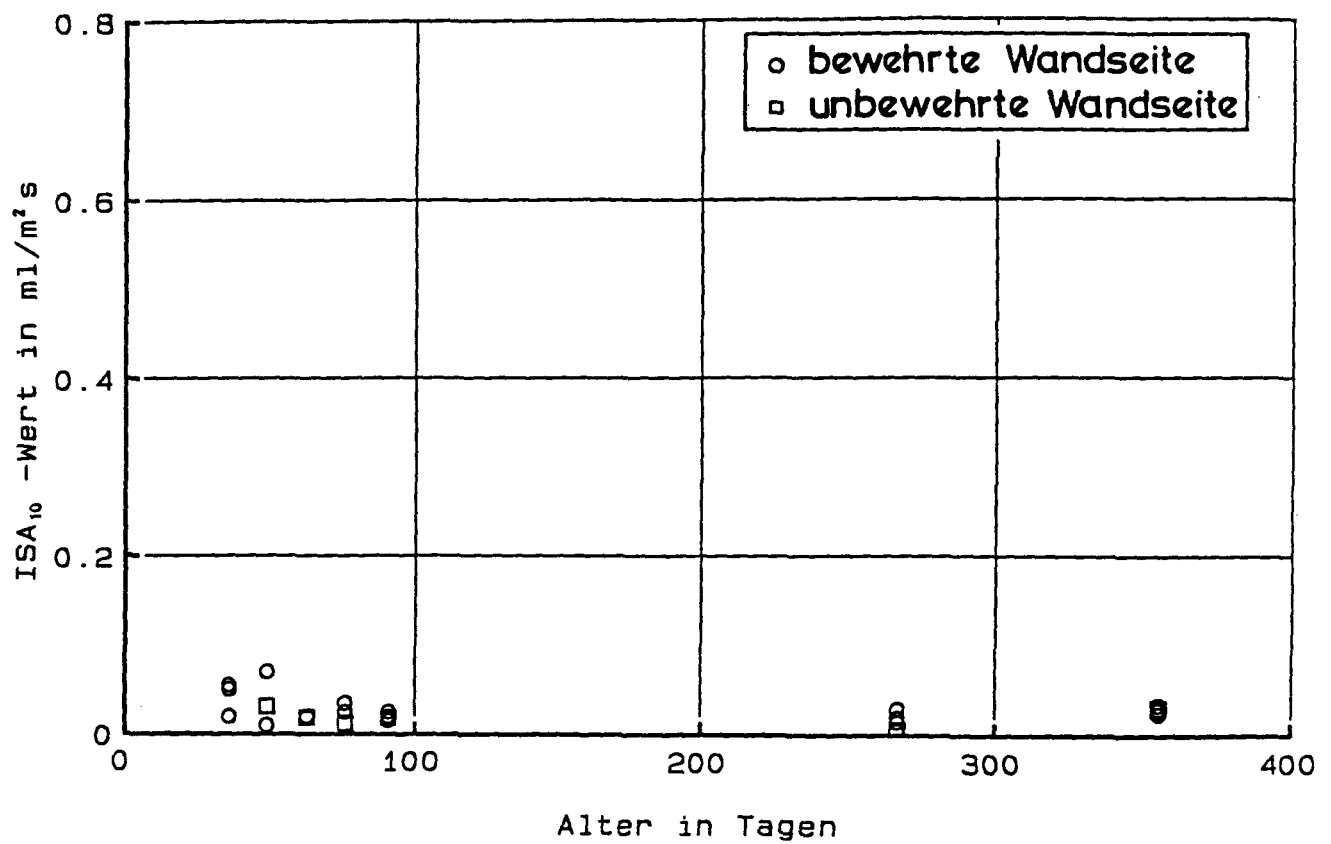


Bild 4.7 36 : Zeitliche Entwicklung des ISA₁₀-Wertes für Wand II. (Messungen auf beiden Wandseiten)

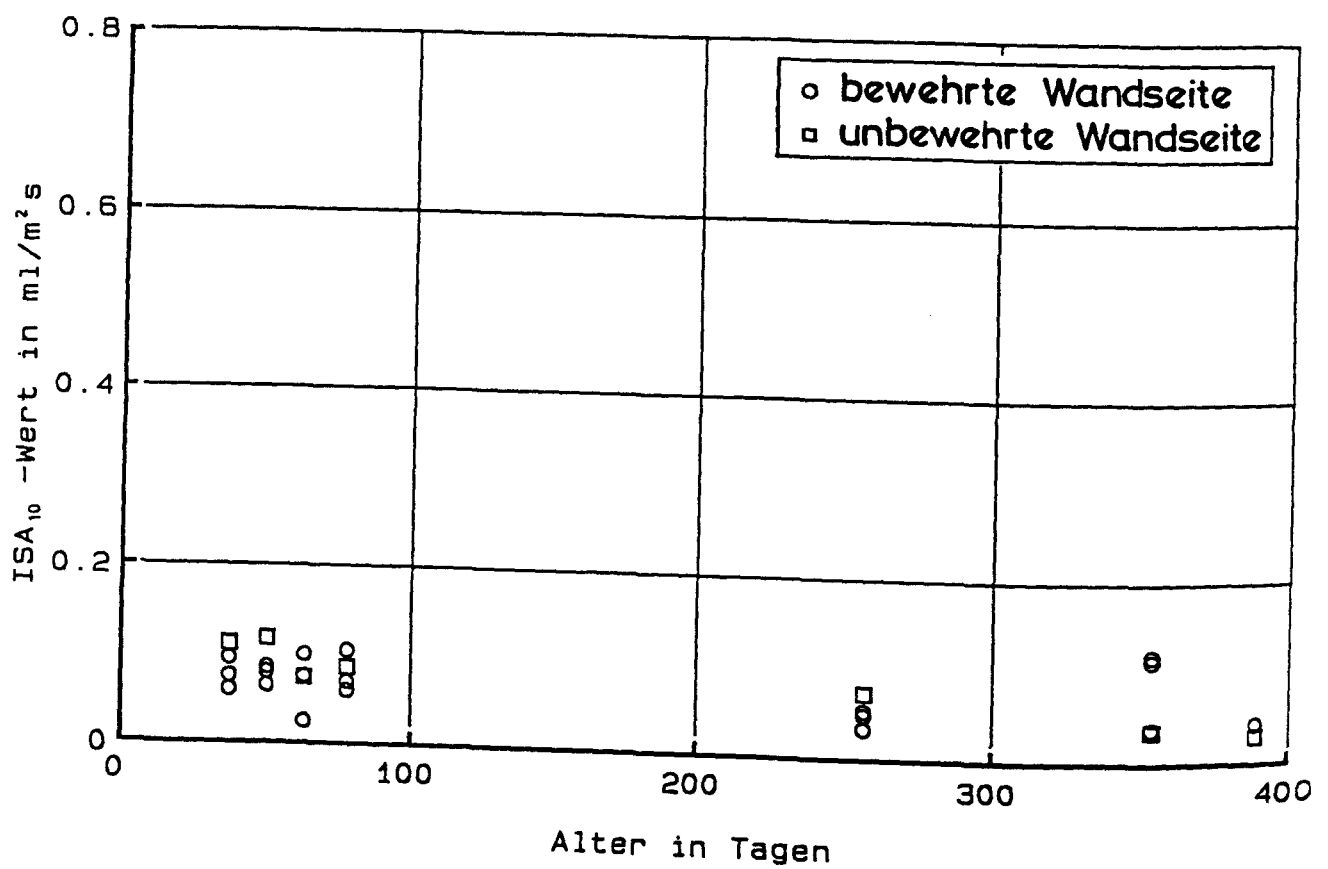


Bild 4.7 37 : Zeitliche Entwicklung des ISA₁₀-Wertes für Wand III. (Messungen auf beiden Wandseiten)

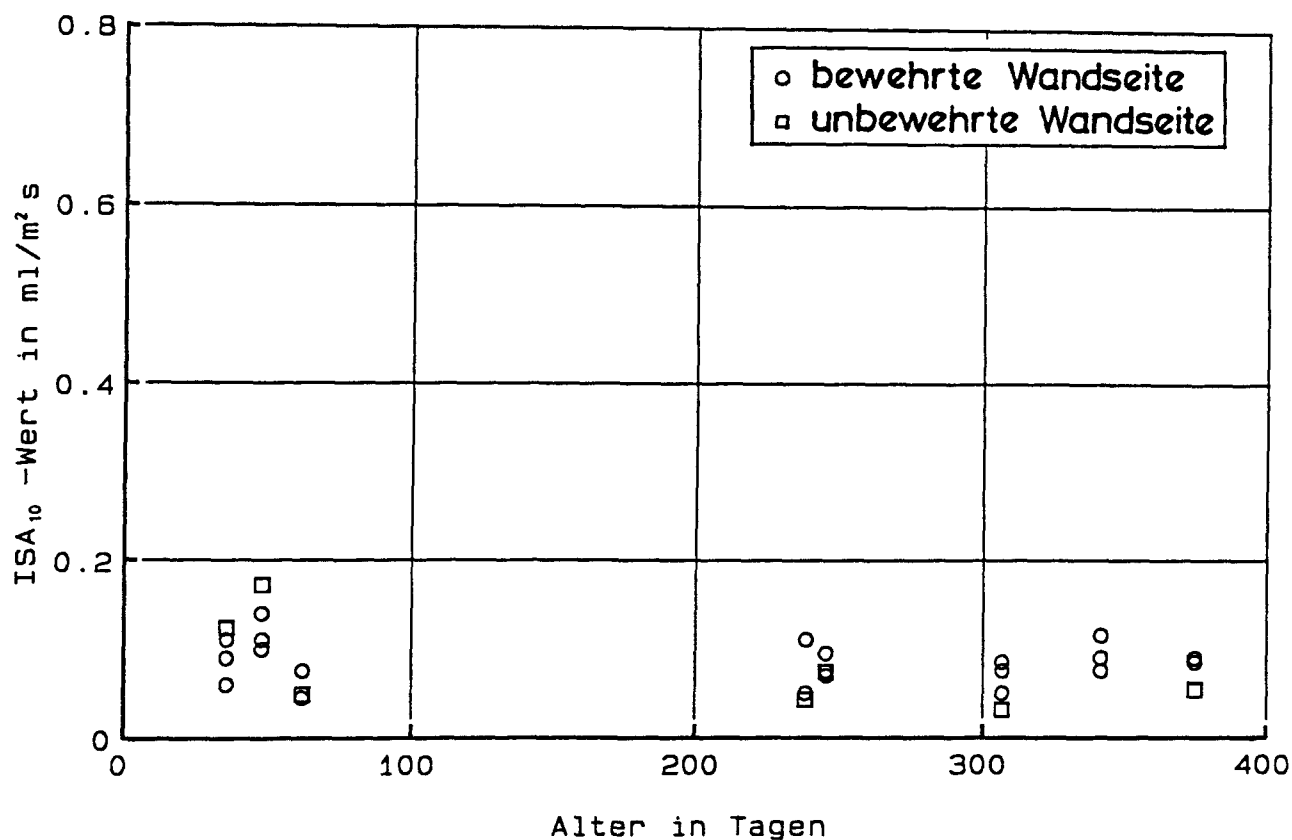


Bild 4.7 38 : Zeitliche Entwicklung des ISA₁₀-Wertes für Wand IV. (Messungen auf beiden Wandseiten)

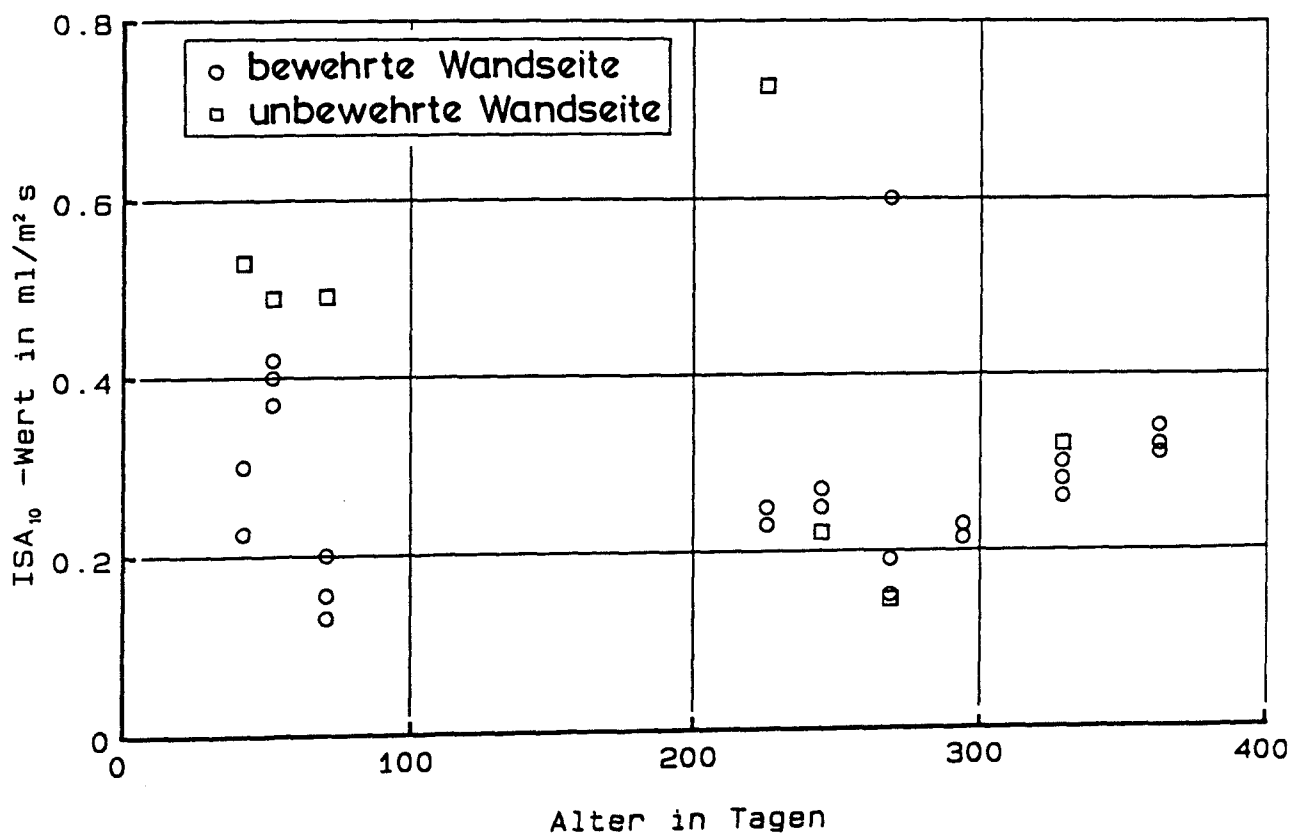


Bild 4.7 39 : Zeitliche Entwicklung des ISA₁₀-Wertes für Wand V. (Messungen auf beiden Wandseiten)

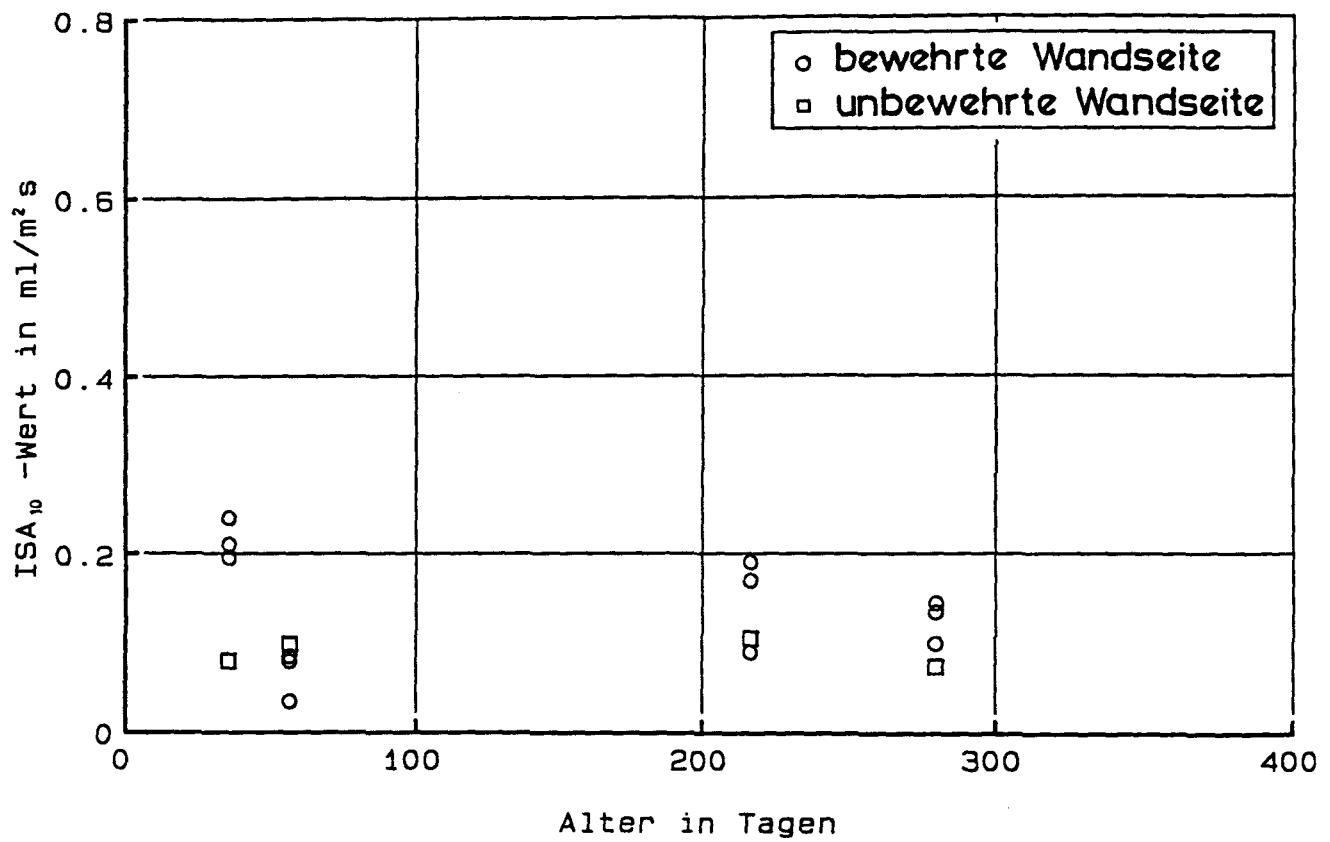


Bild 4.7 40 : Zeitliche Entwicklung des ISA₁₀-Wertes für Wand VI. (Messungen auf beiden Wandseiten)

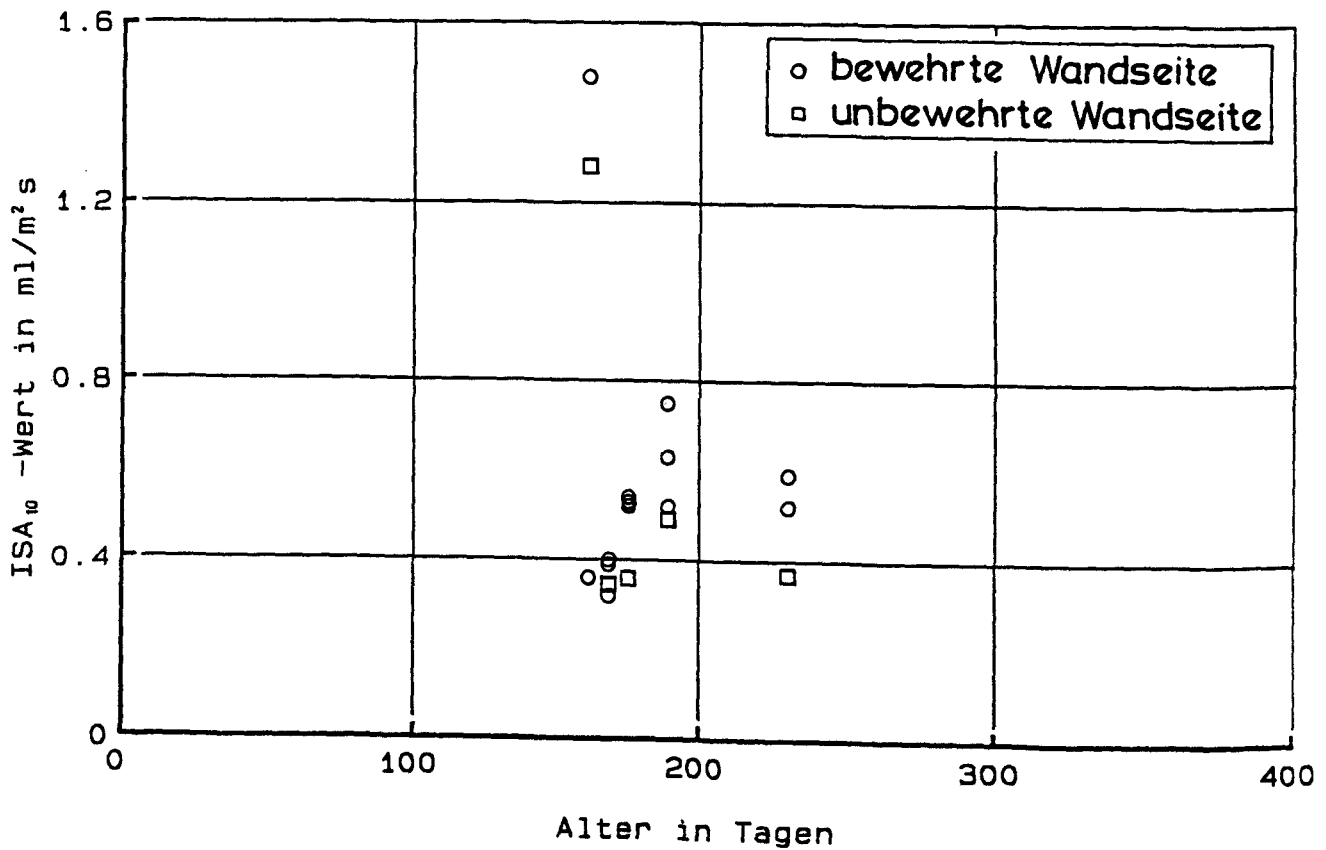


Bild 4.7 41 : Zeitliche Entwicklung des ISA₁₀-Wertes für Wand VII. (Messungen auf beiden Wandseiten)

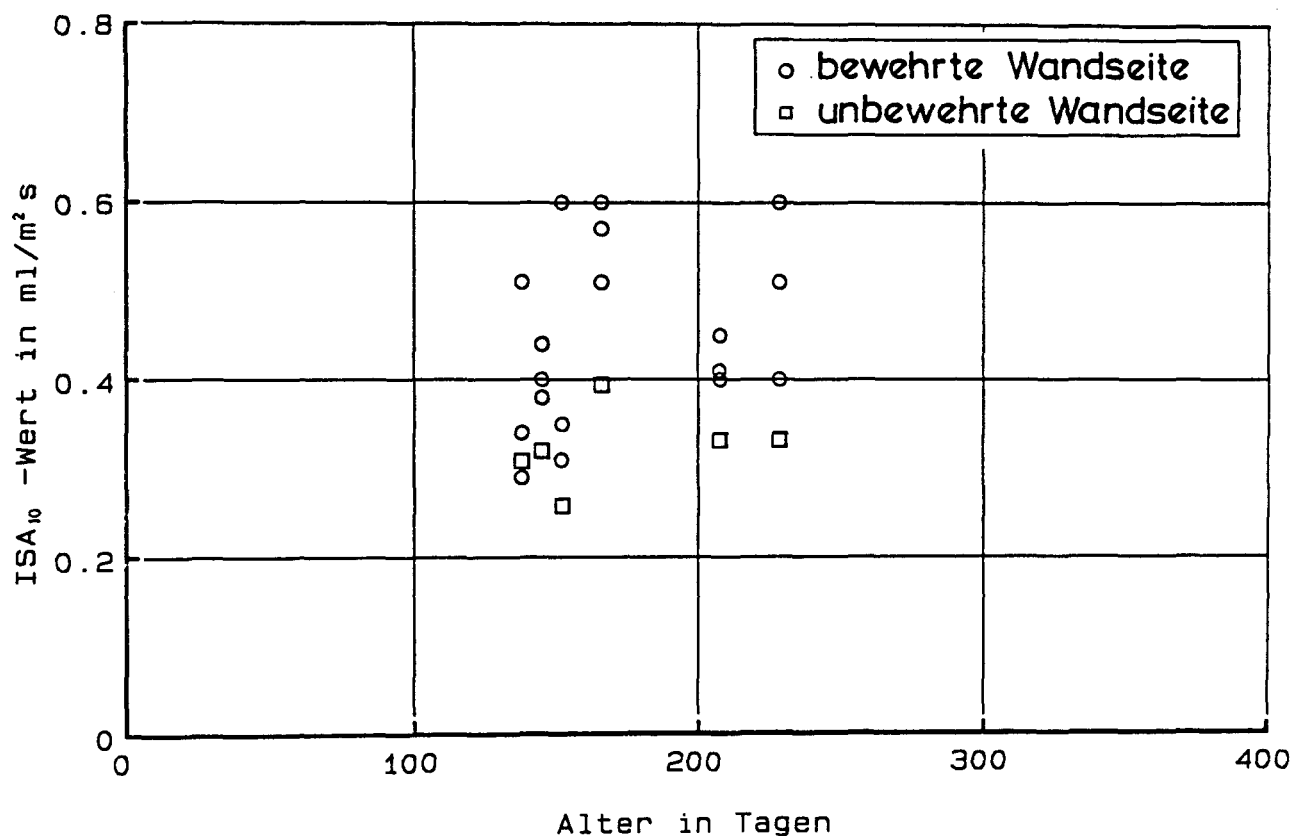


Bild 4.7.42 : Zeitliche Entwicklung des ISA₁₀-Wertes für Wand VIII. (Messungen auf beiden Wandseiten)

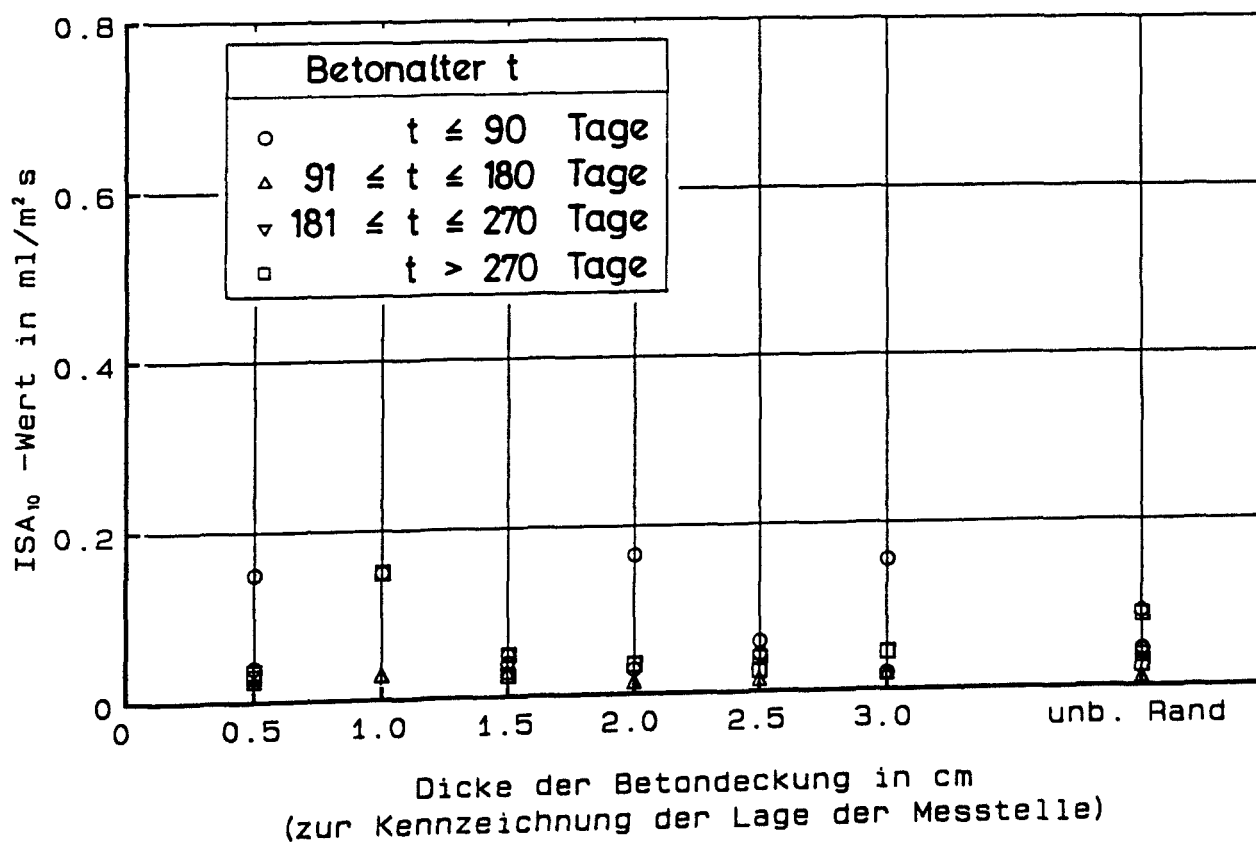


Bild 4.7.43 : Abhängigkeit des ISA₁₀-Wertes von der Dicke der Betondeckung für Wand I.

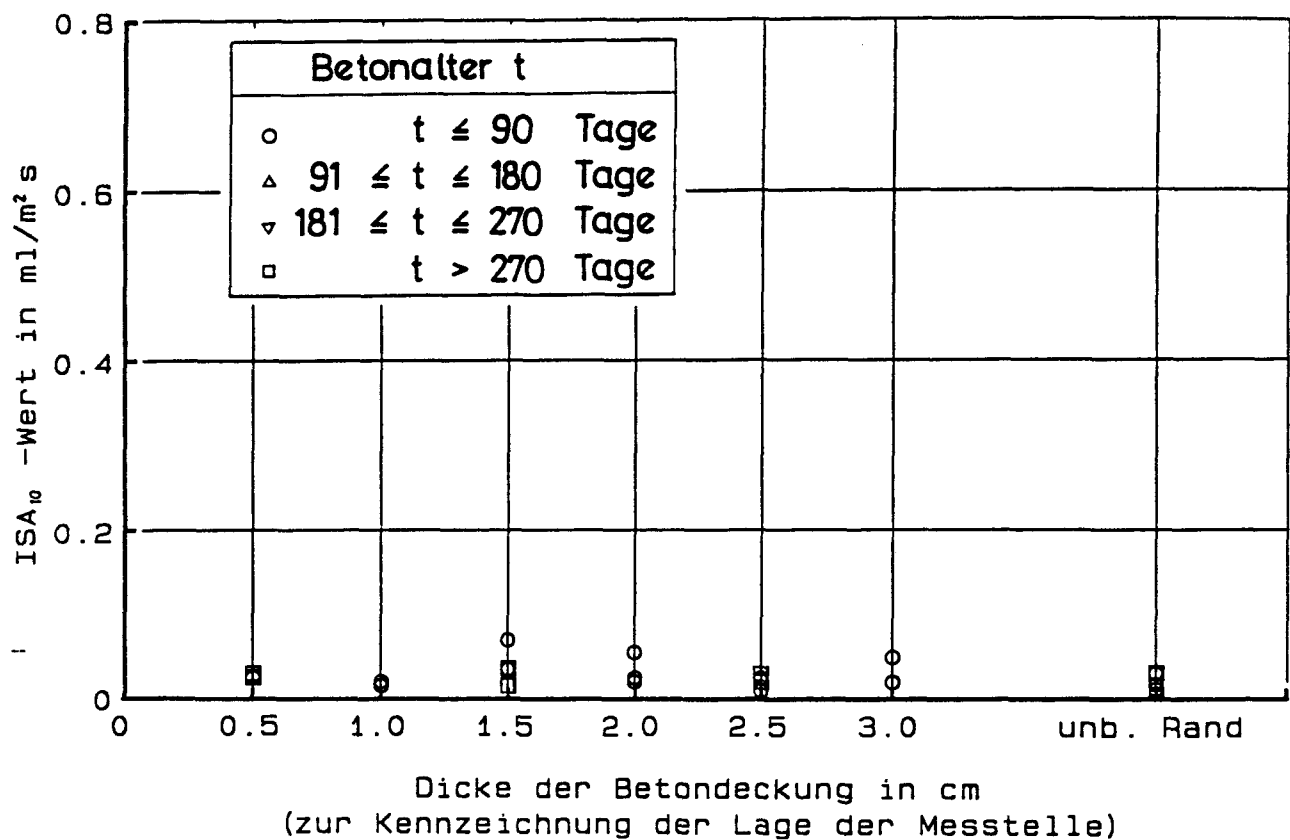


Bild 4.7.44 : Abhängigkeit des ISA₁₀-Wertes von der Dicke der Betondeckung für Wand II.

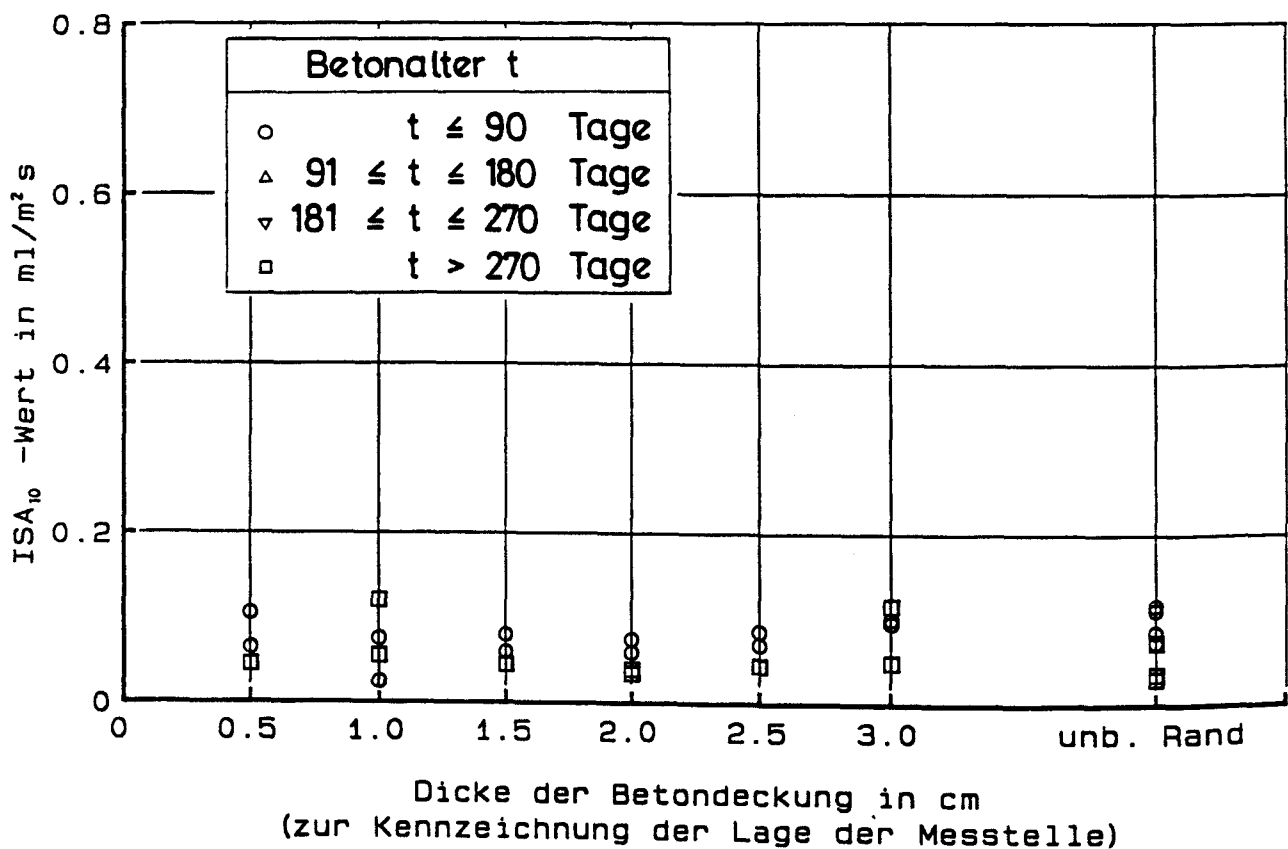


Bild 4.7.45 : Abhängigkeit des ISA₁₀-Wertes von der Dicke der Betondeckung für Wand III.

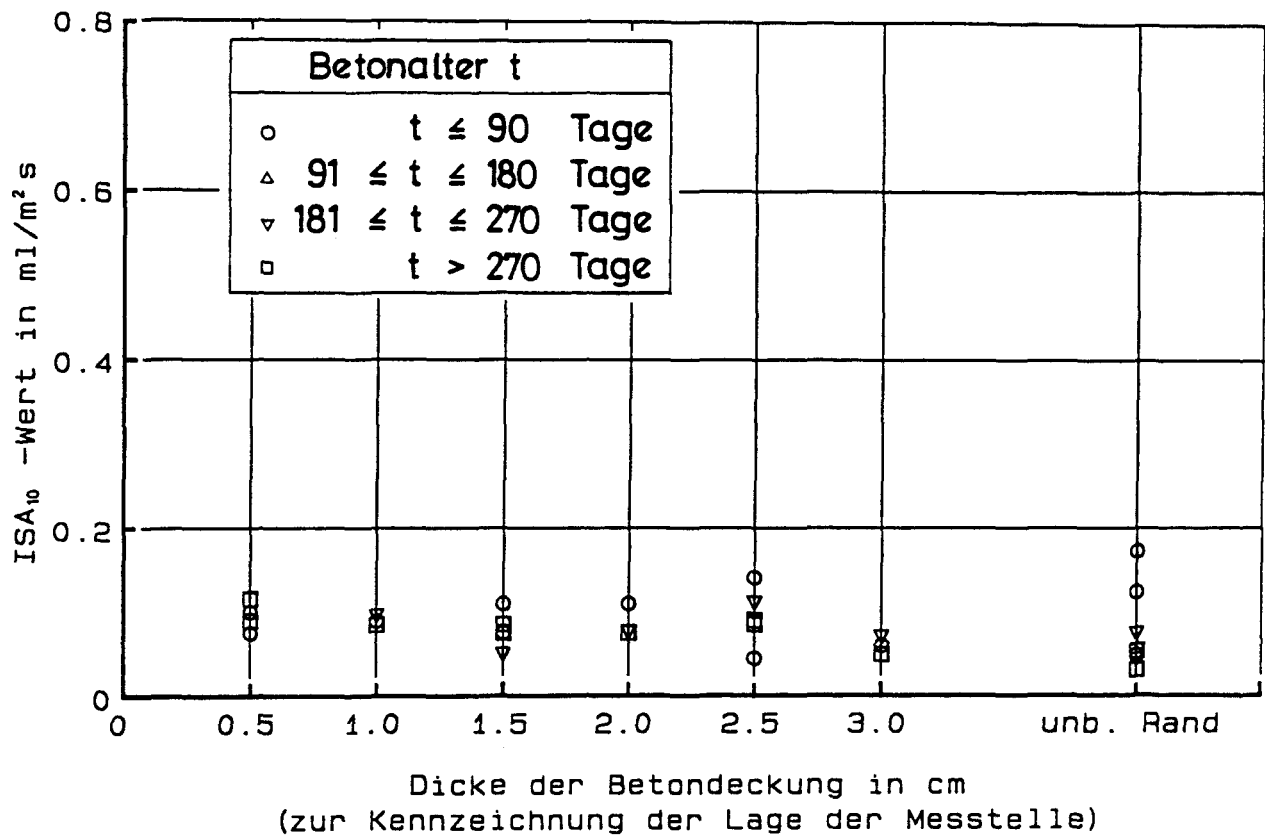


Bild 4.7.46 : Abhängigkeit des ISA₁₀-Wertes von der Dicke der Betondeckung für Wand IV.

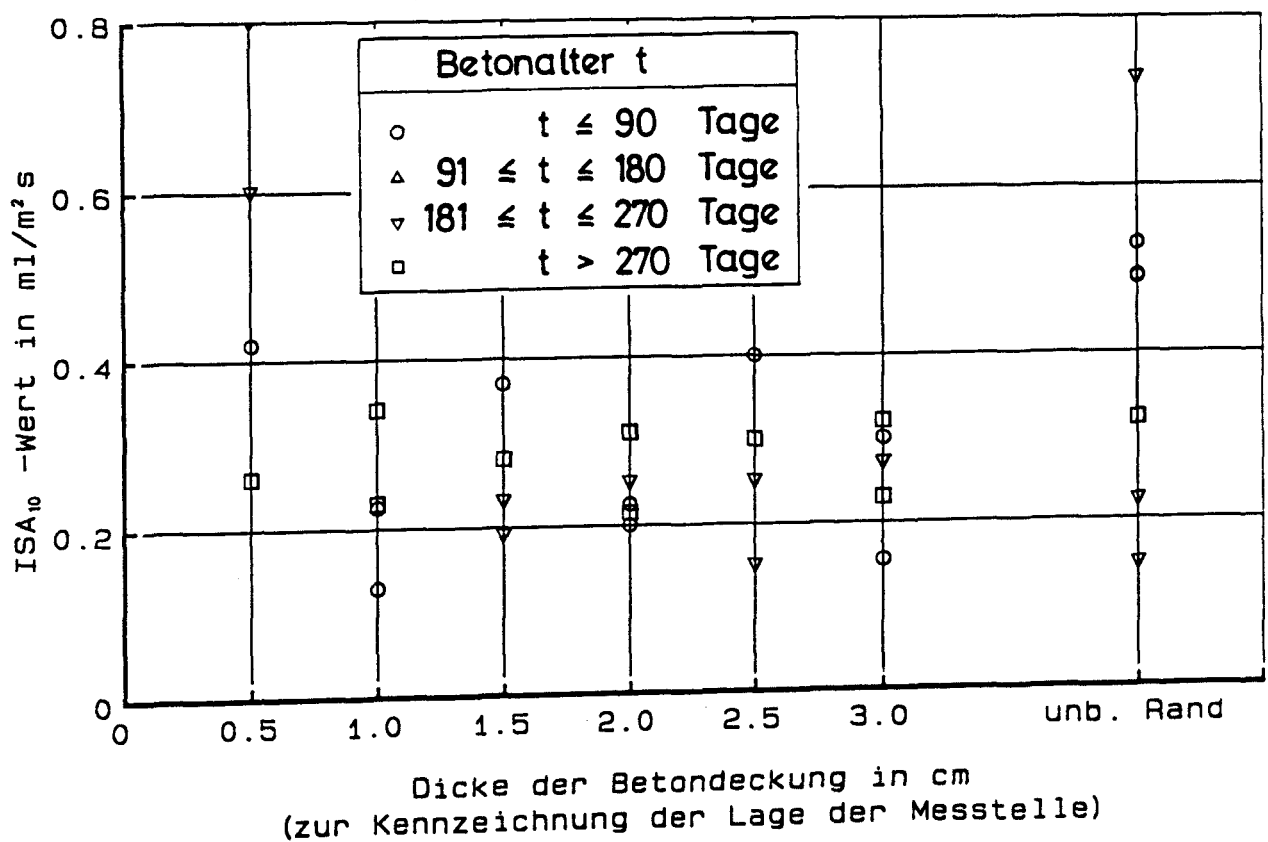


Bild 4.7.47 : Abhängigkeit des ISA₁₀-Wertes von der Dicke der Betondeckung für Wand V.

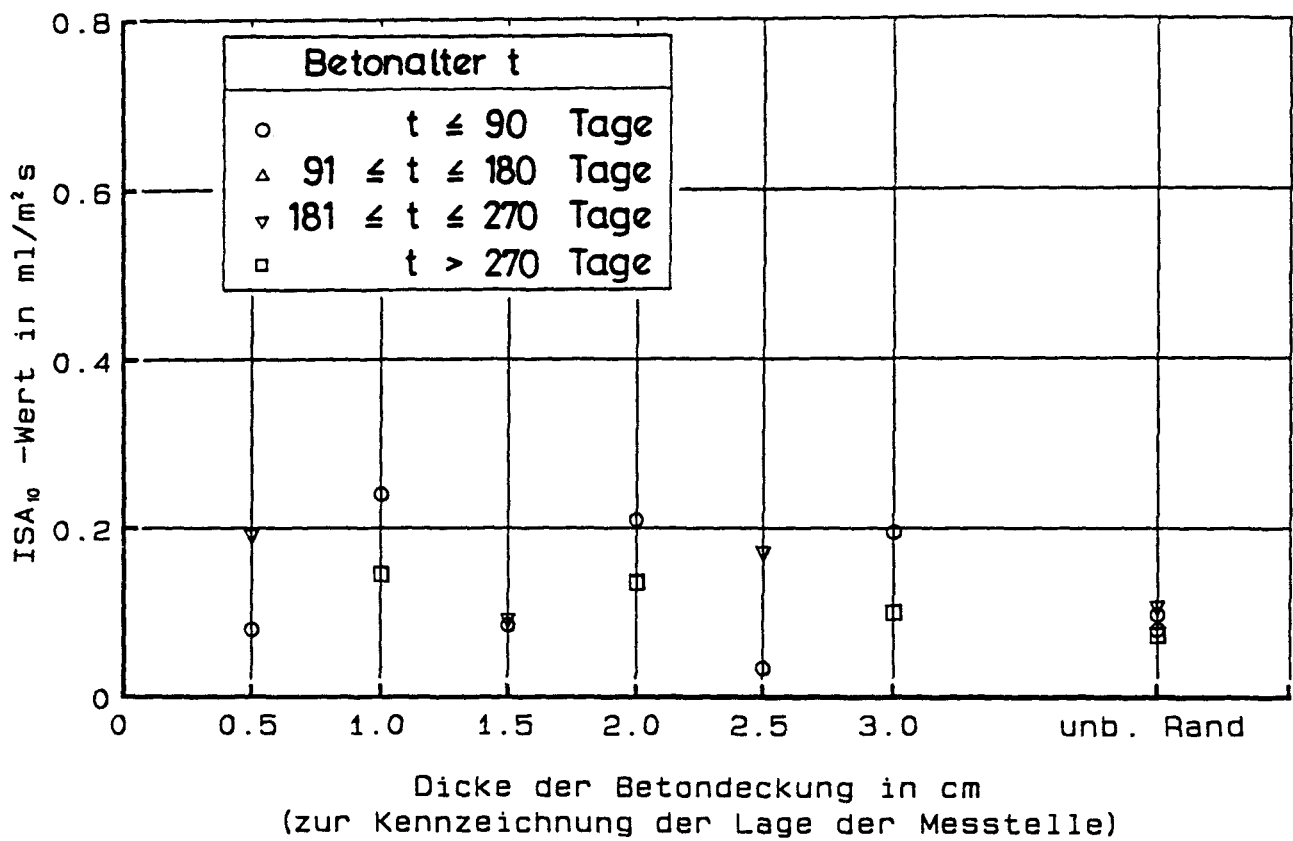


Bild 4.7.48 : Abhängigkeit des ISA_{10} -Wertes von der Dicke der Betondeckung für Wand VI.

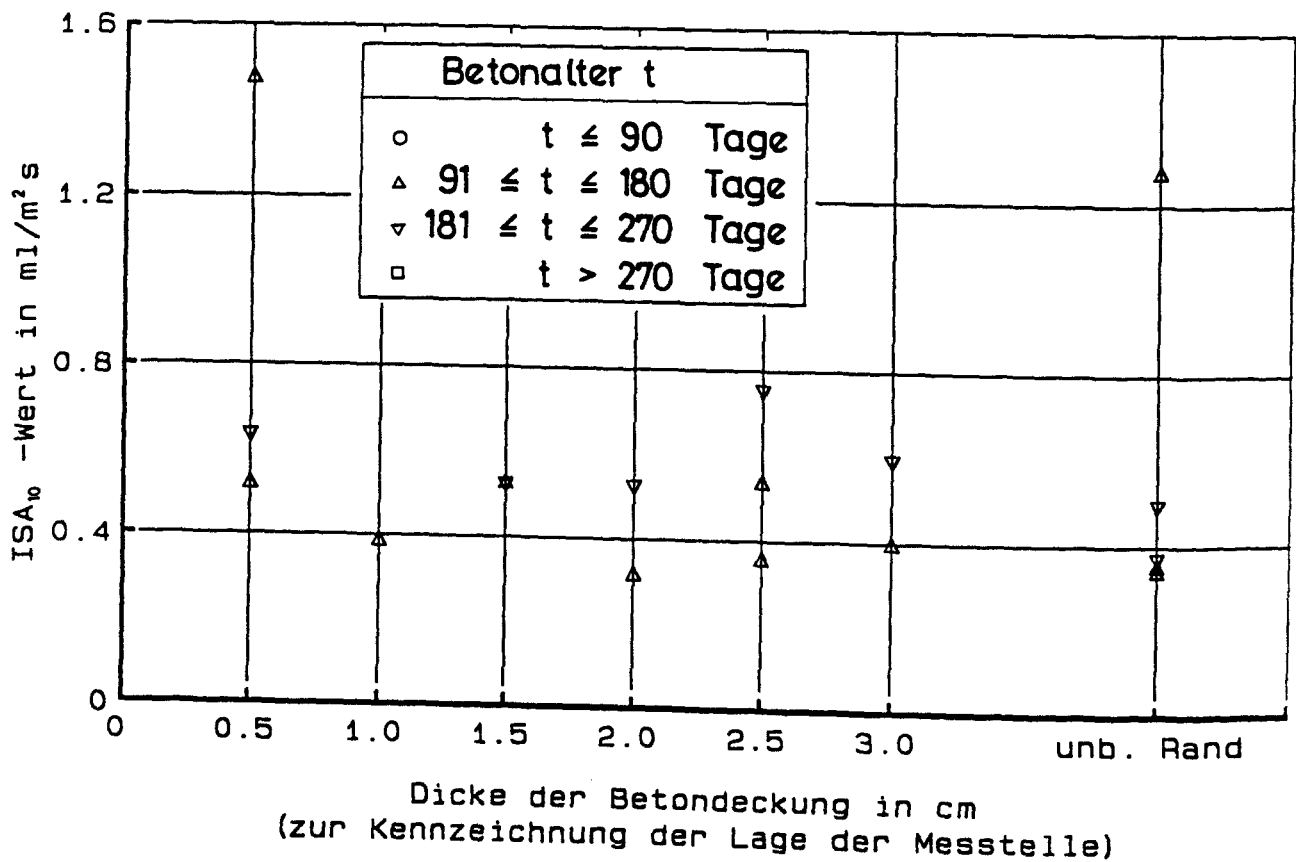


Bild 4.7.49 : Abhängigkeit des ISA_{10} -Wertes von der Dicke der Betondeckung für Wand VII.

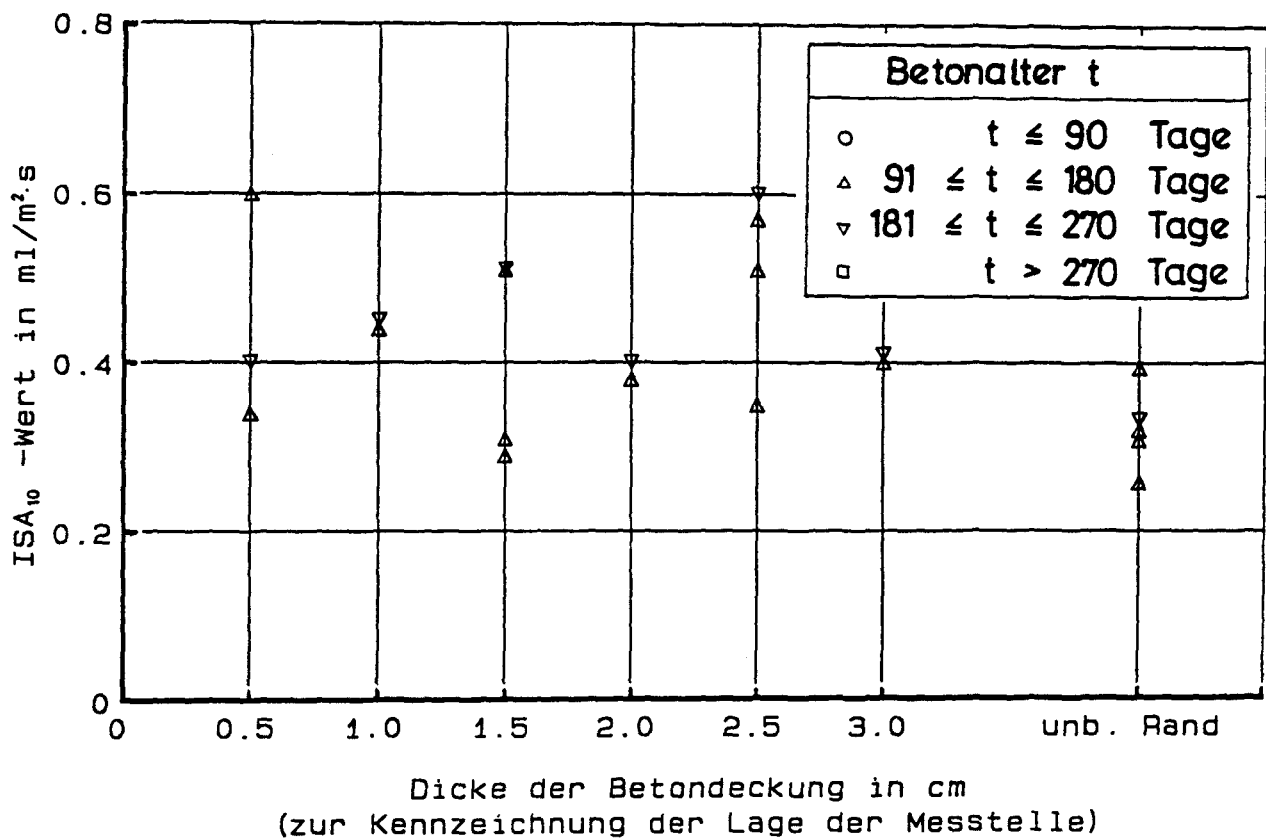


Bild 4.7.50 : Abhängigkeit des ISA₁₀-Wertes von der Dicke der Betondeckung für Wand VIII.

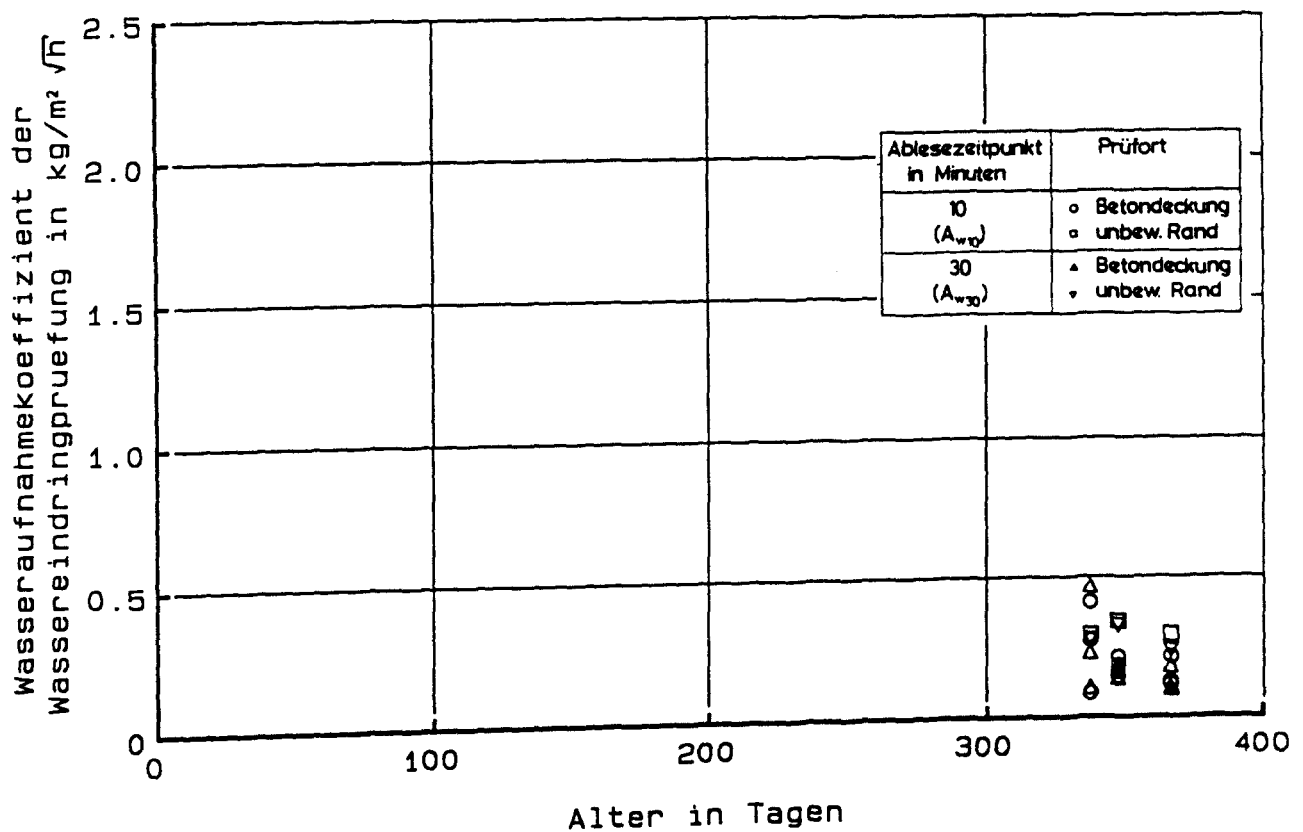


Bild 4.7.51 : Zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung A_{w10} und A_{w30} für Wand I.

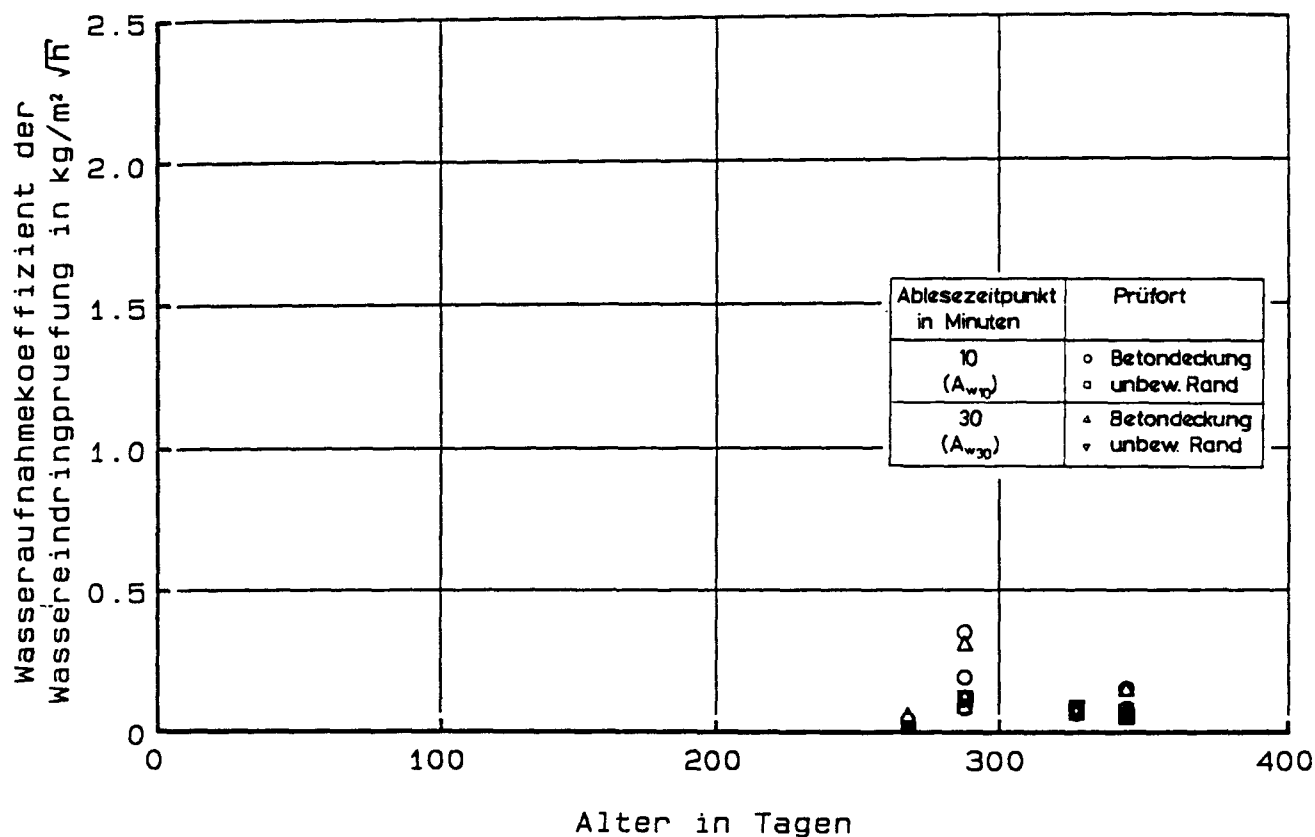


Bild 4.7 52 : Zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung A_{w10} und A_{w30} für Wand II.

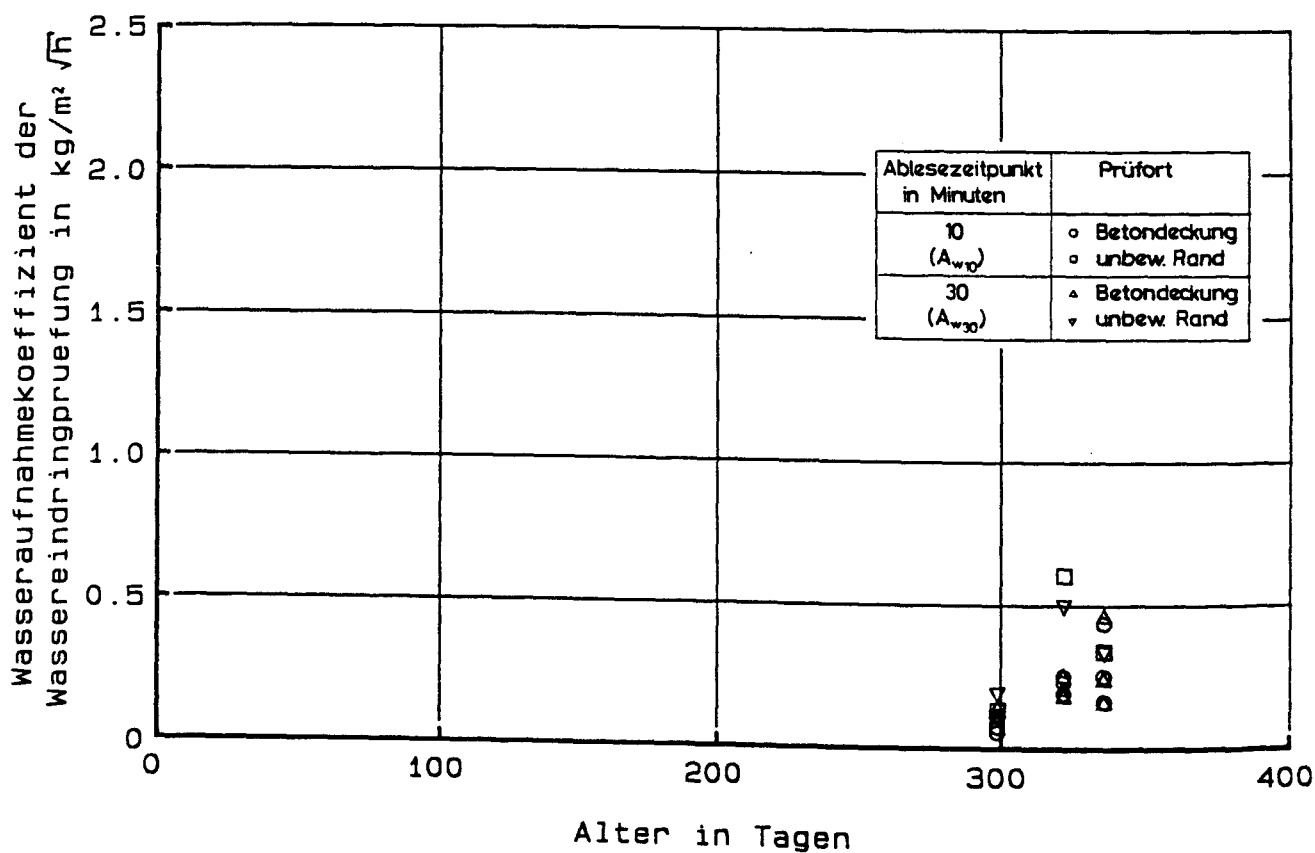


Bild 4.7 53 : Zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung A_{w10} und A_{w30} für Wand III.

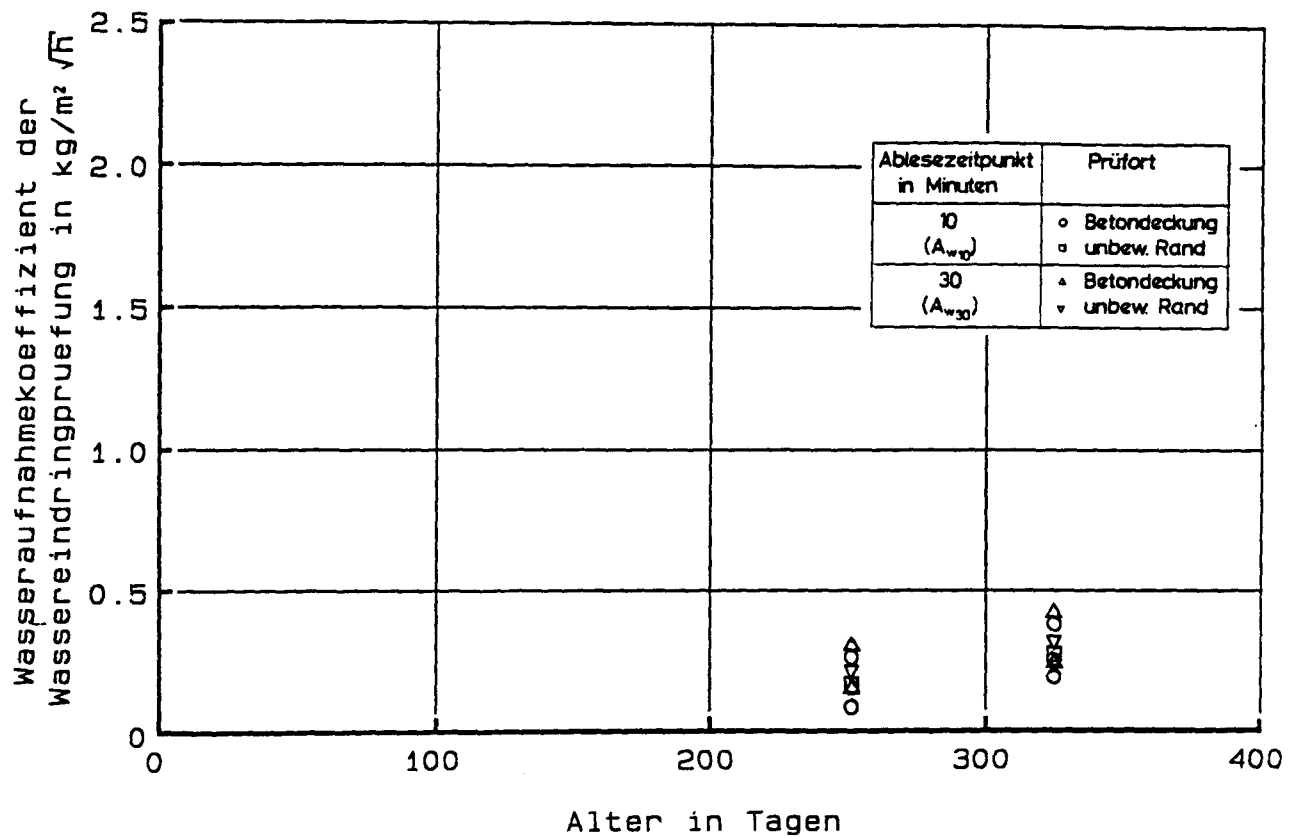


Bild 4.7 54 : Zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung A_{w10} und A_{w30} für Wand IV.

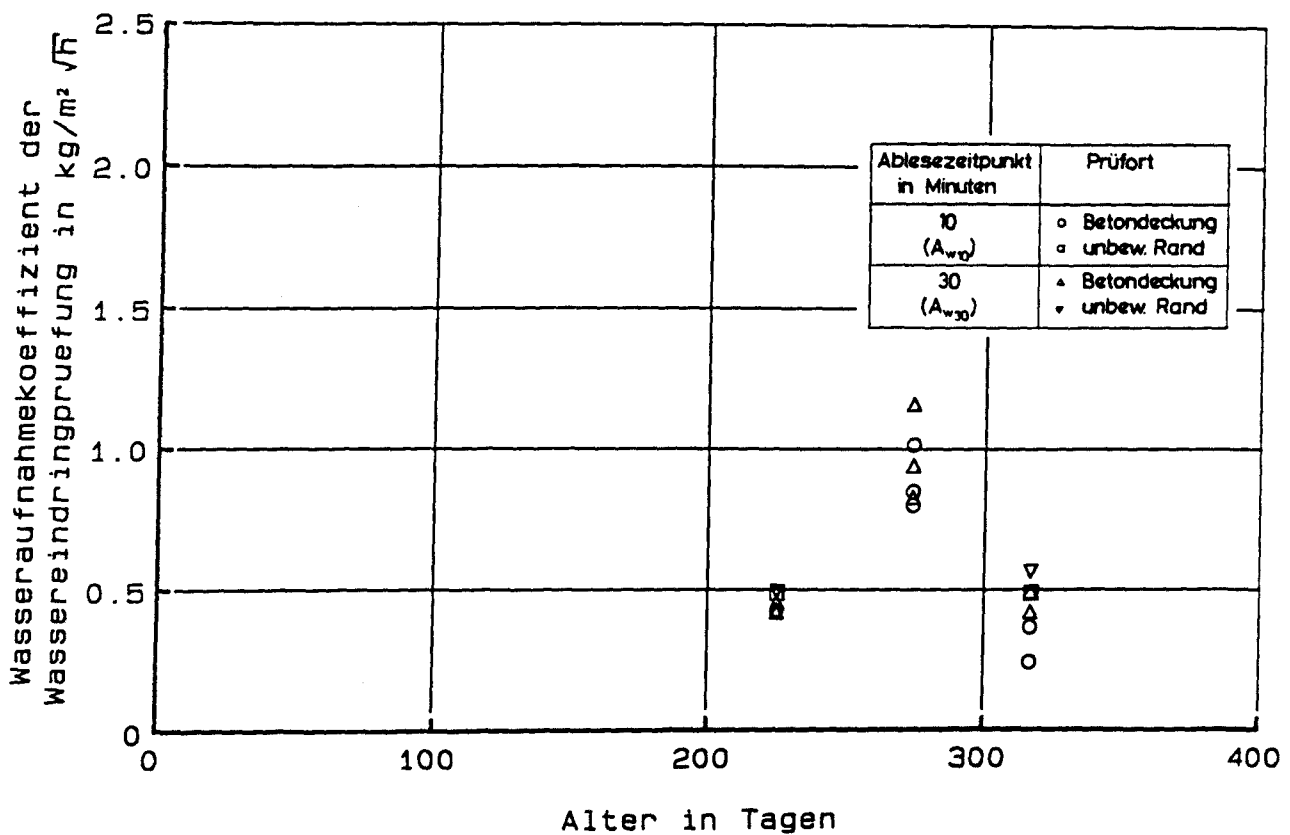


Bild 4.7 55 : Zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung A_{w10} und A_{w30} für Wand V.

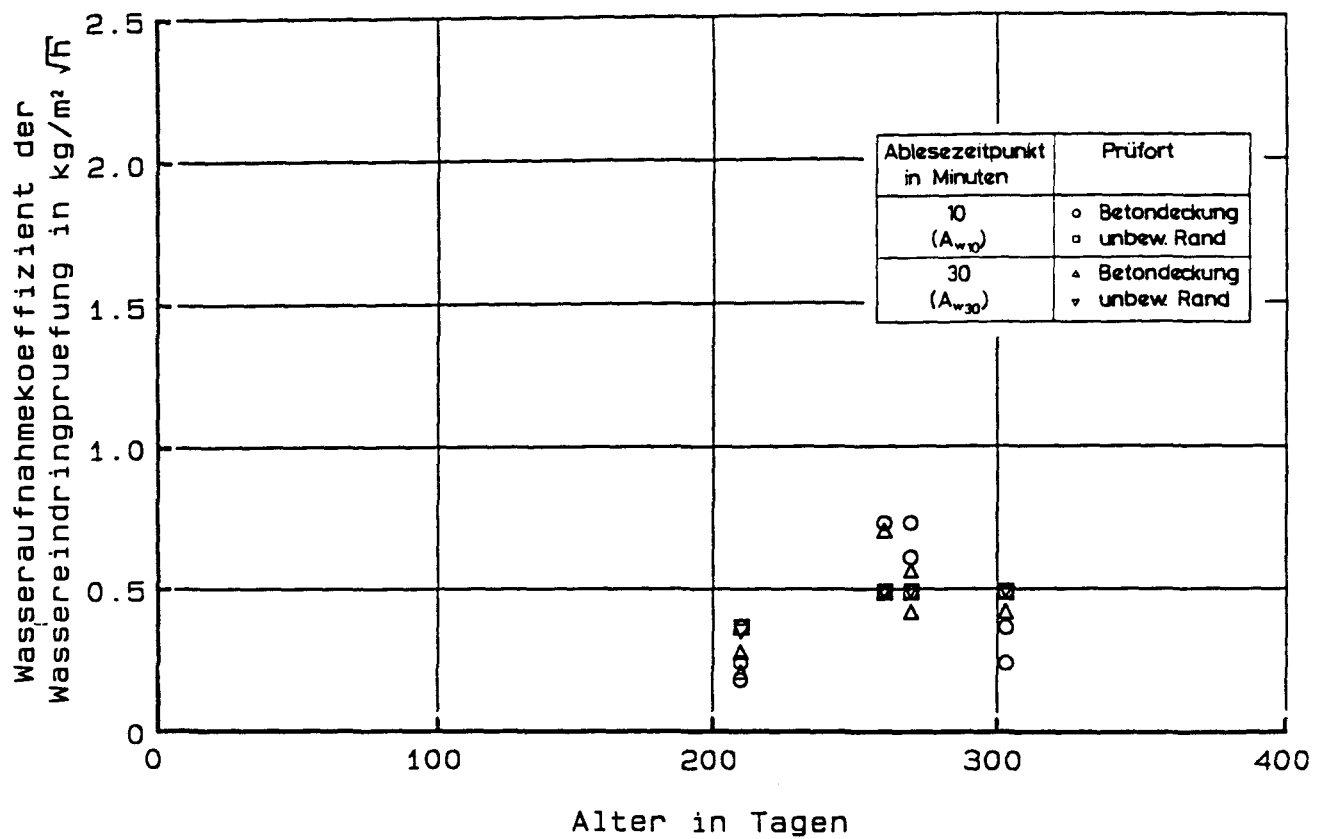


Bild 4.7 56 : Zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung A_{w10} und A_{w30} für Wand VI.

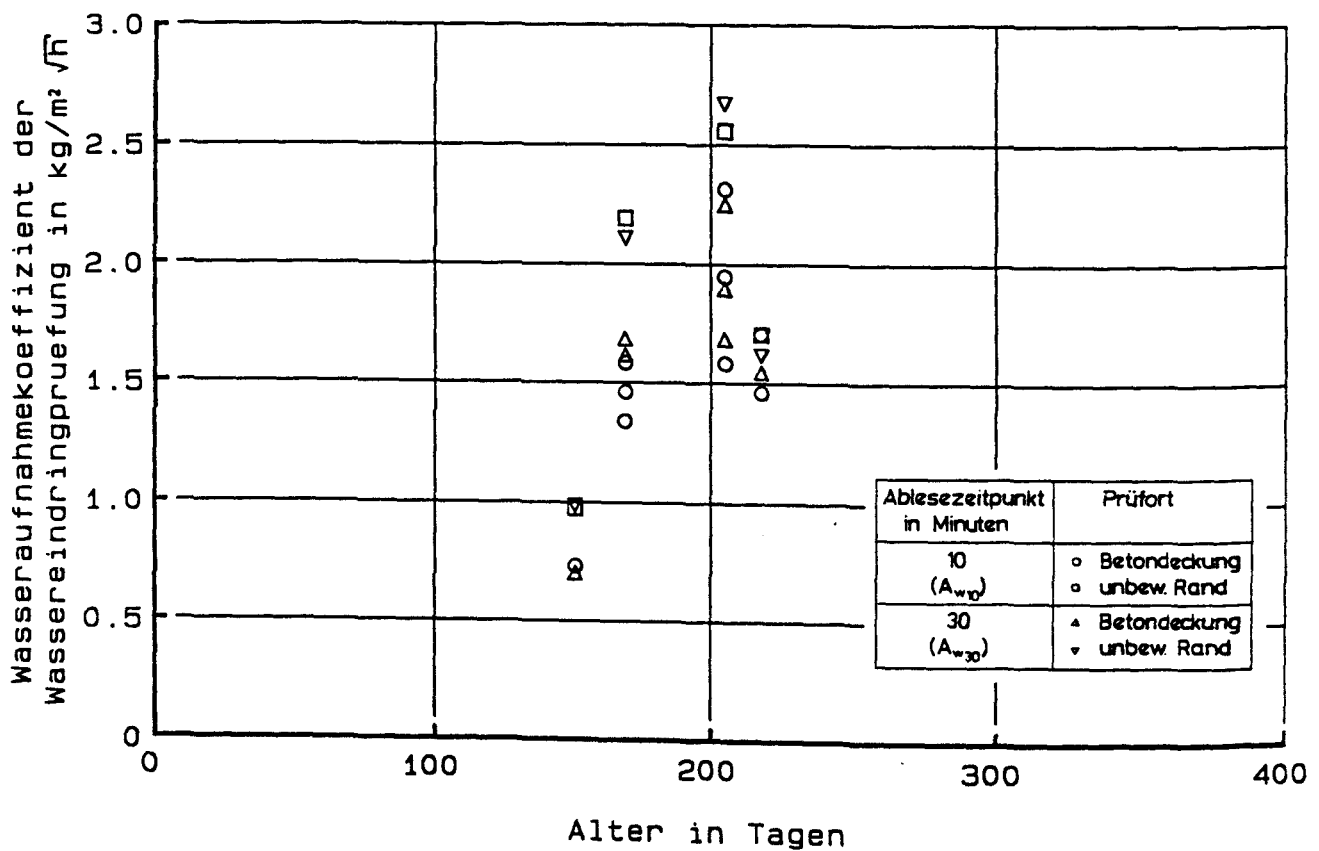


Bild 4.7 57 : Zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung A_{w10} und A_{w30} für Wand VII.

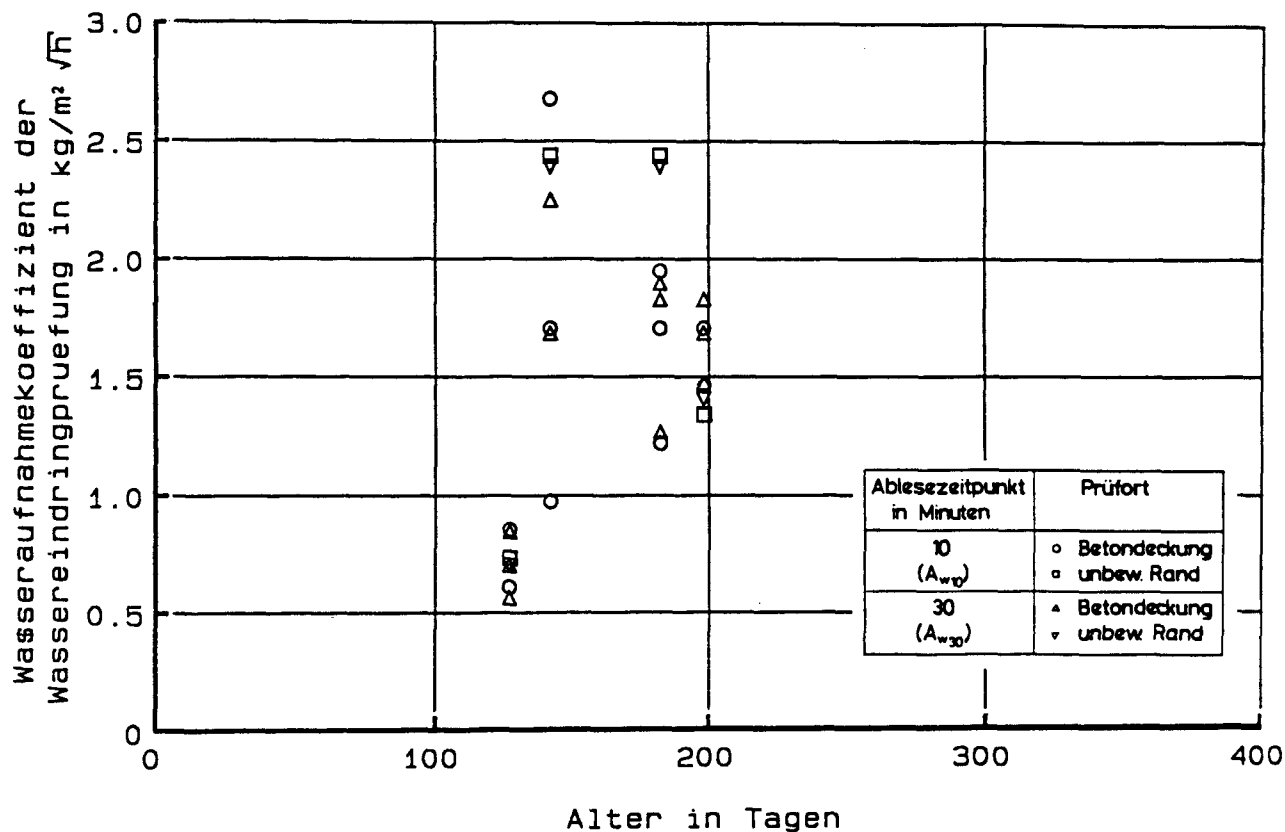


Bild 4.7 58 : Zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung A_{w10} und A_{w30} für Wand VIII.

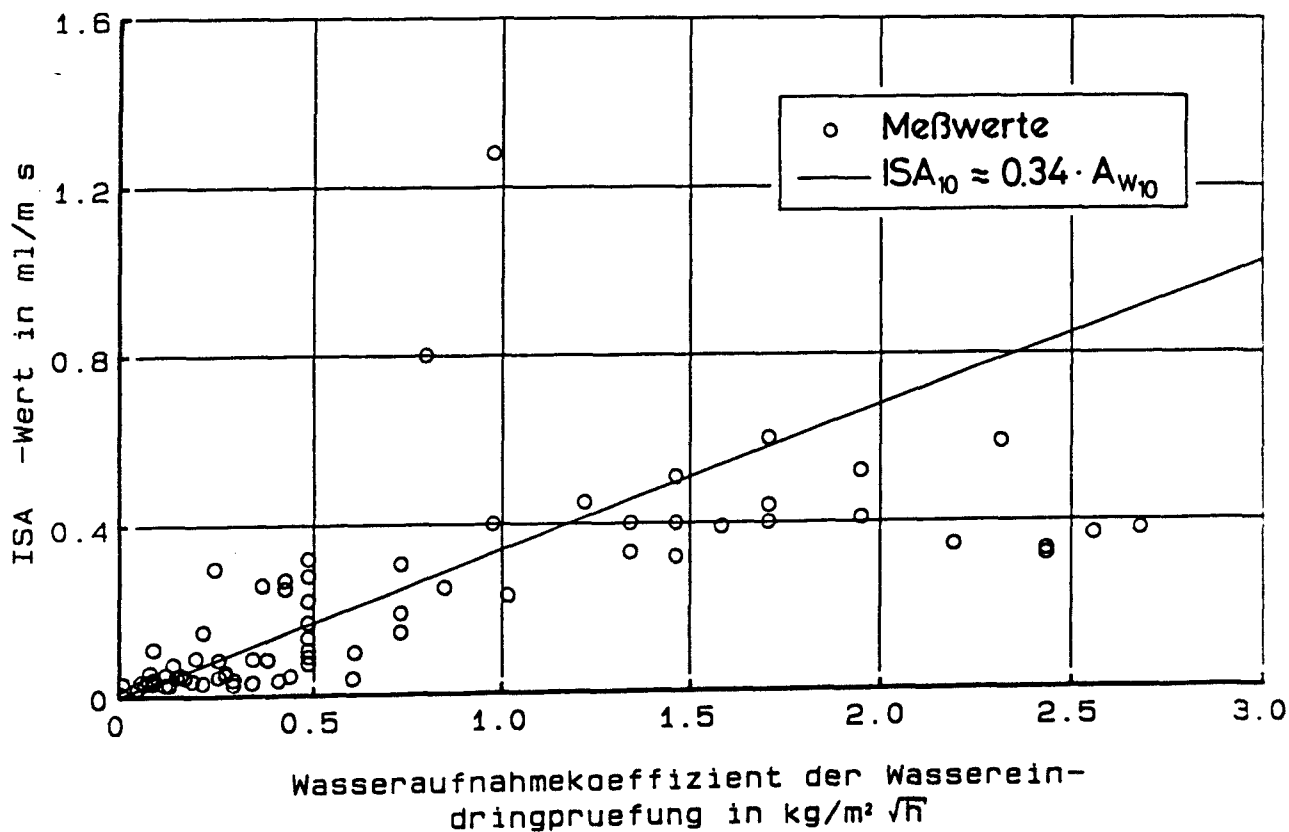


Bild 4.7 59 : Beziehung zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung A_{w10} und dem ISA_{10} -Wert.

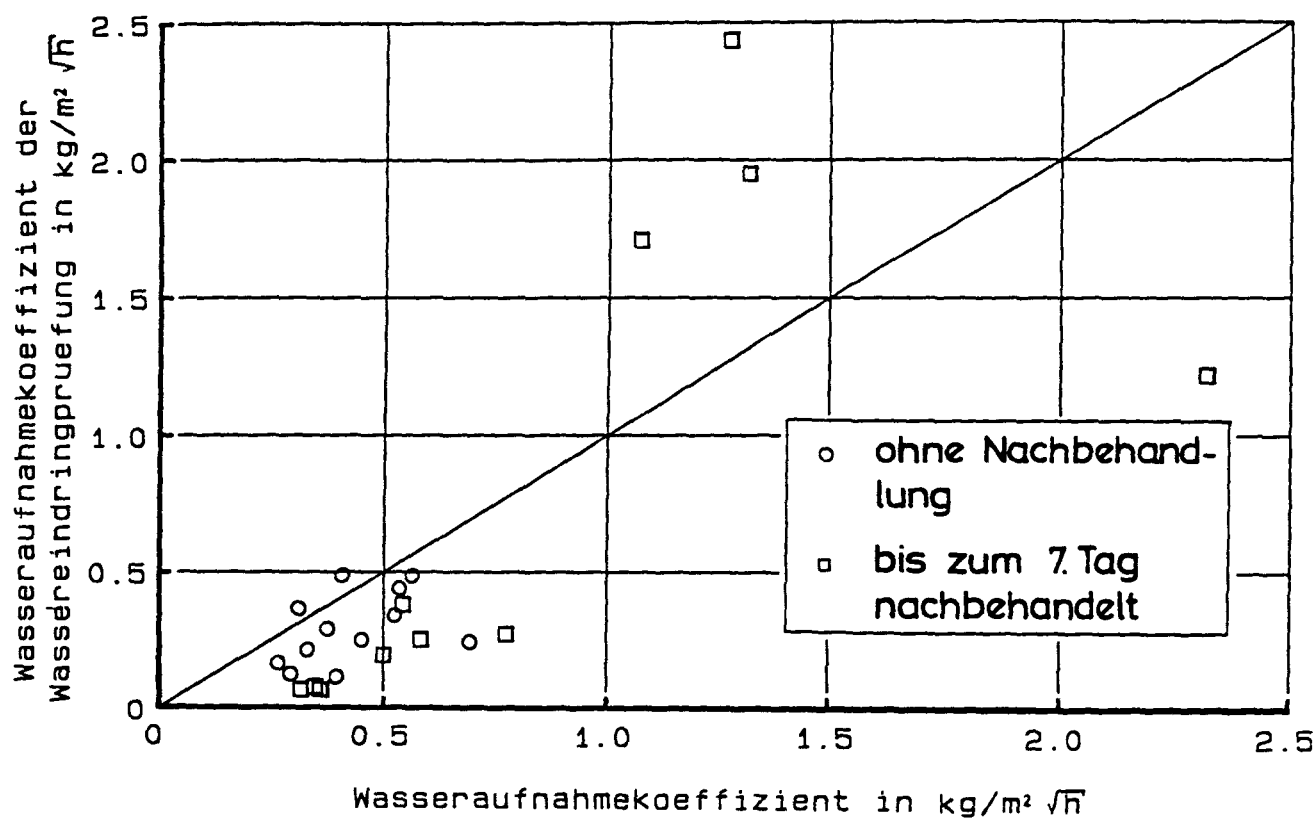


Bild 4.7 60 : Beziehung zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten der Wassereindringprüfung A_{w10} gemessen auf feuchten Wandoberflächen und dem Wasseraufnahmekoeffizienten gemessen an getrockneten Laborproben vergleichbaren Betonalters.

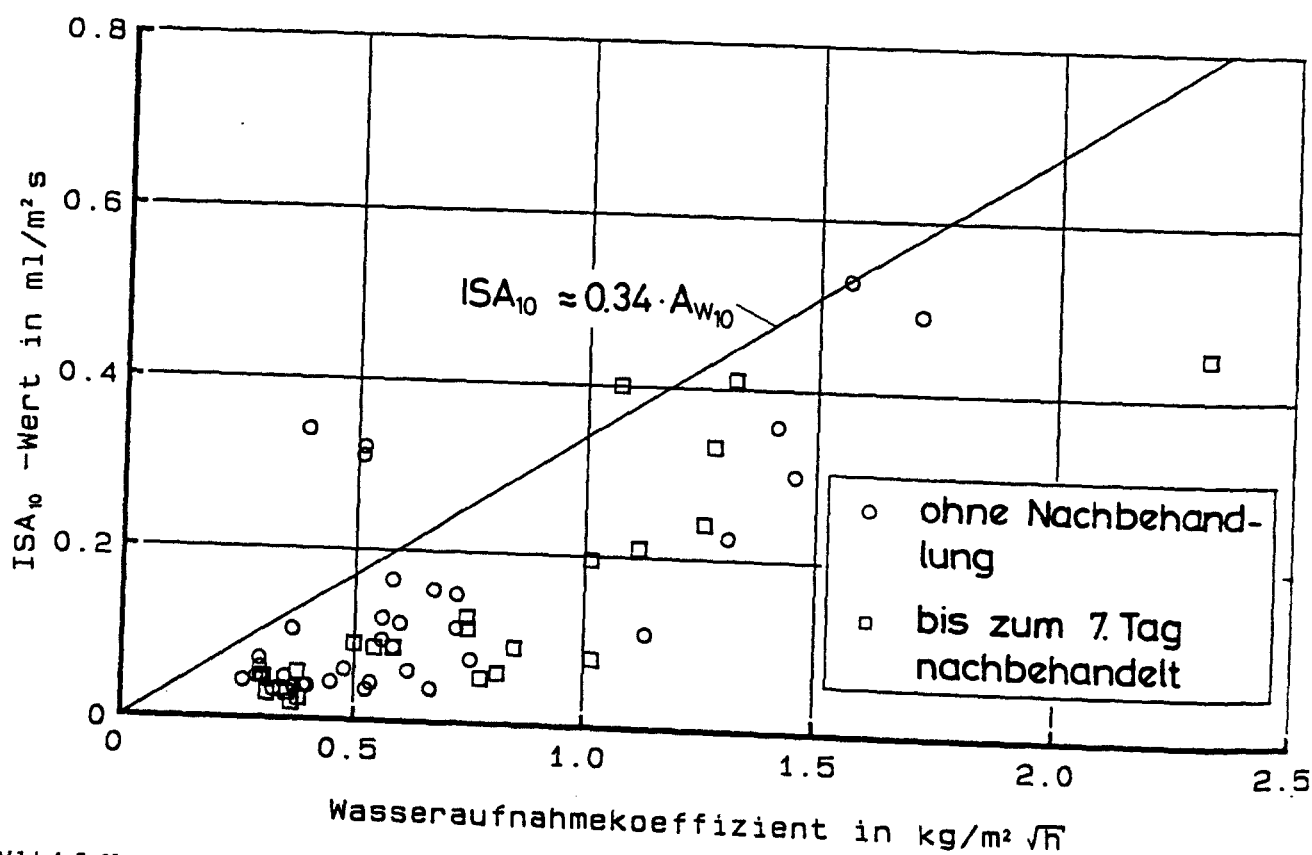


Bild 4.7 61 : Beziehung zwischen dem ISA₁₀-Wert gemessen auf feuchten Wandoberflächen und dem Wasseraufnahmekoeffizienten gemessen an getrockneten Laborproben vergleichbaren Betonalters.

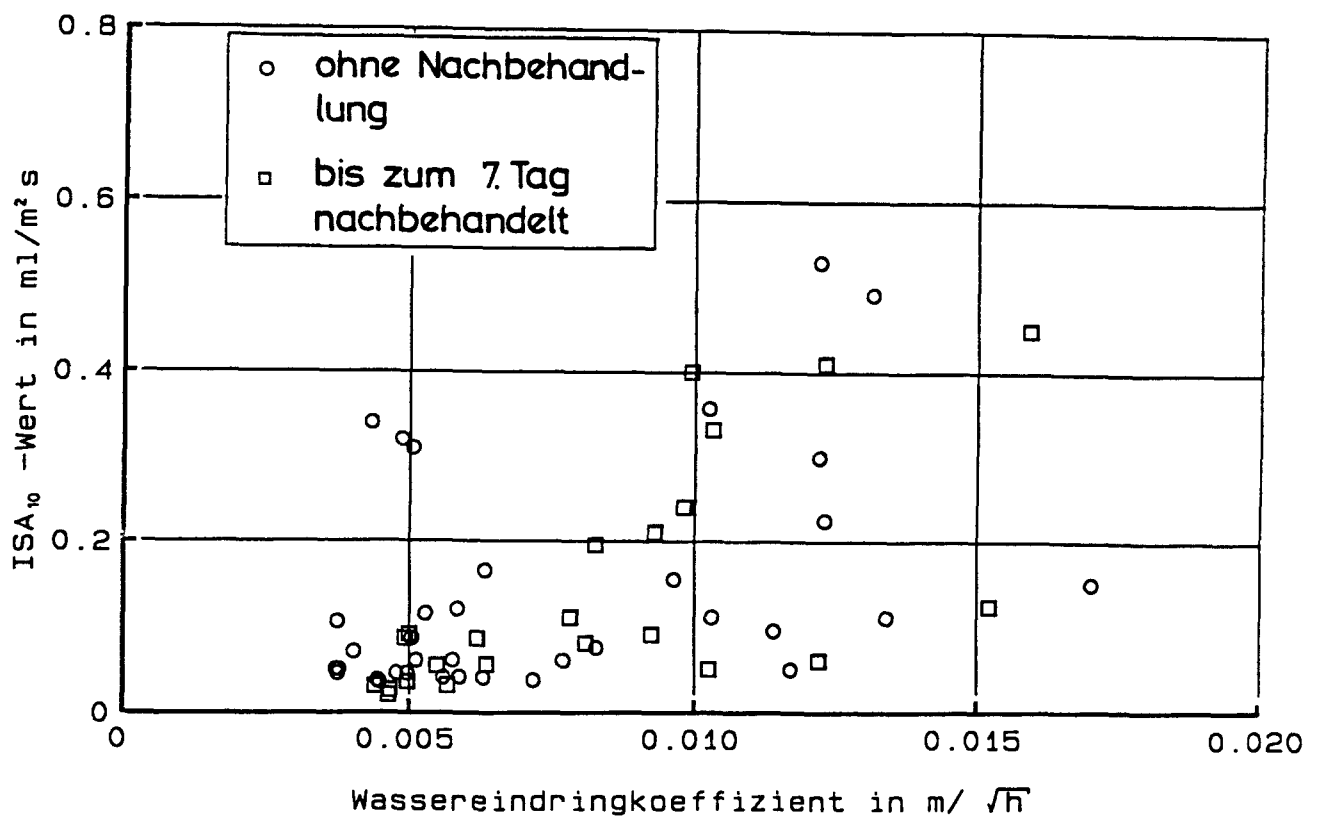


Bild 4.7 62 : Beziehung zwischen dem ISA_{10} -Wert gemessen auf feuchten Wandoberflächen und dem Wassereindringkoeffizienten gemessen an getrockneten Laborproben vergleichbaren Betonalters.

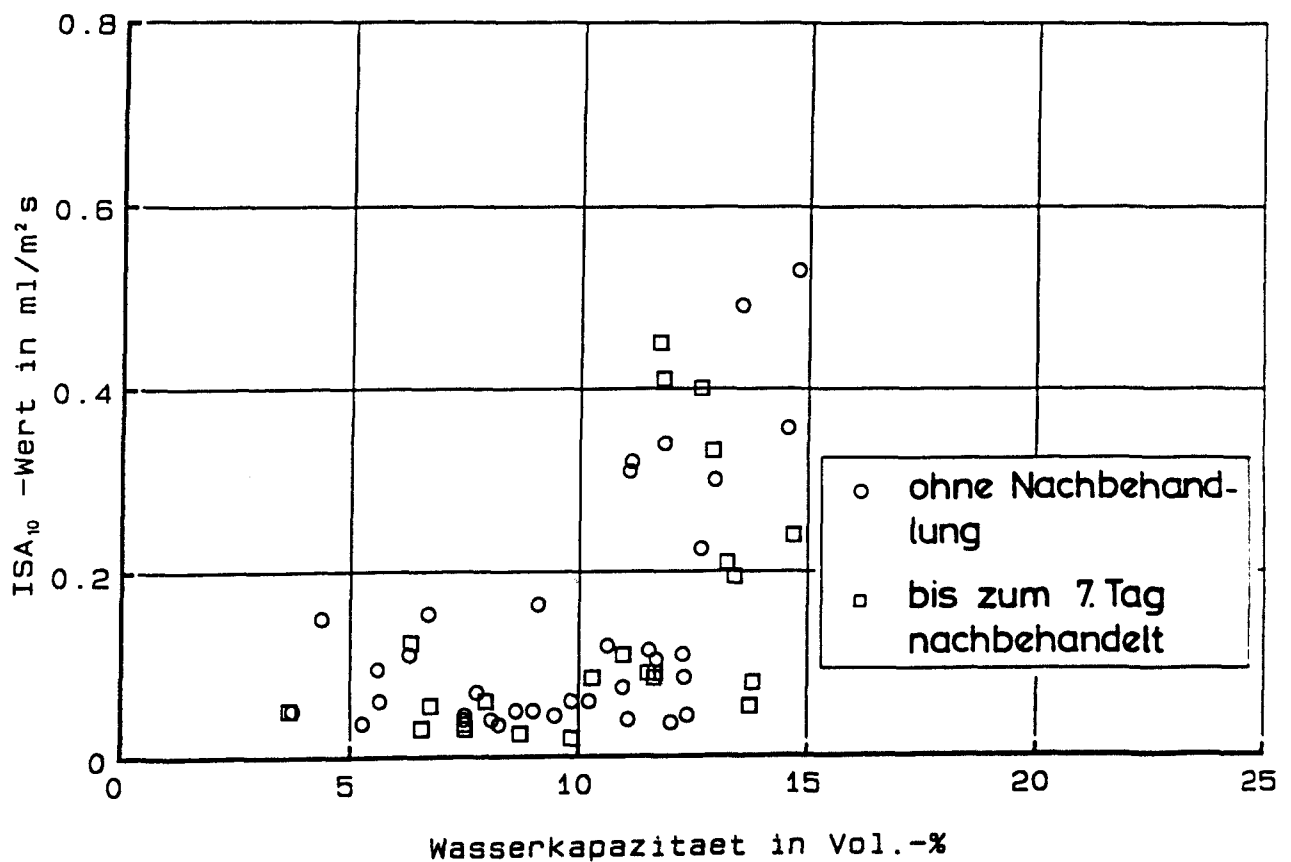


Bild 4.7 63 : Beziehung zwischen dem ISA_{10} -Wert gemessen auf feuchten Wandoberflächen und der Wasserkapazität gemessen an getrockneten Laborproben vergleichbaren Betonalters.

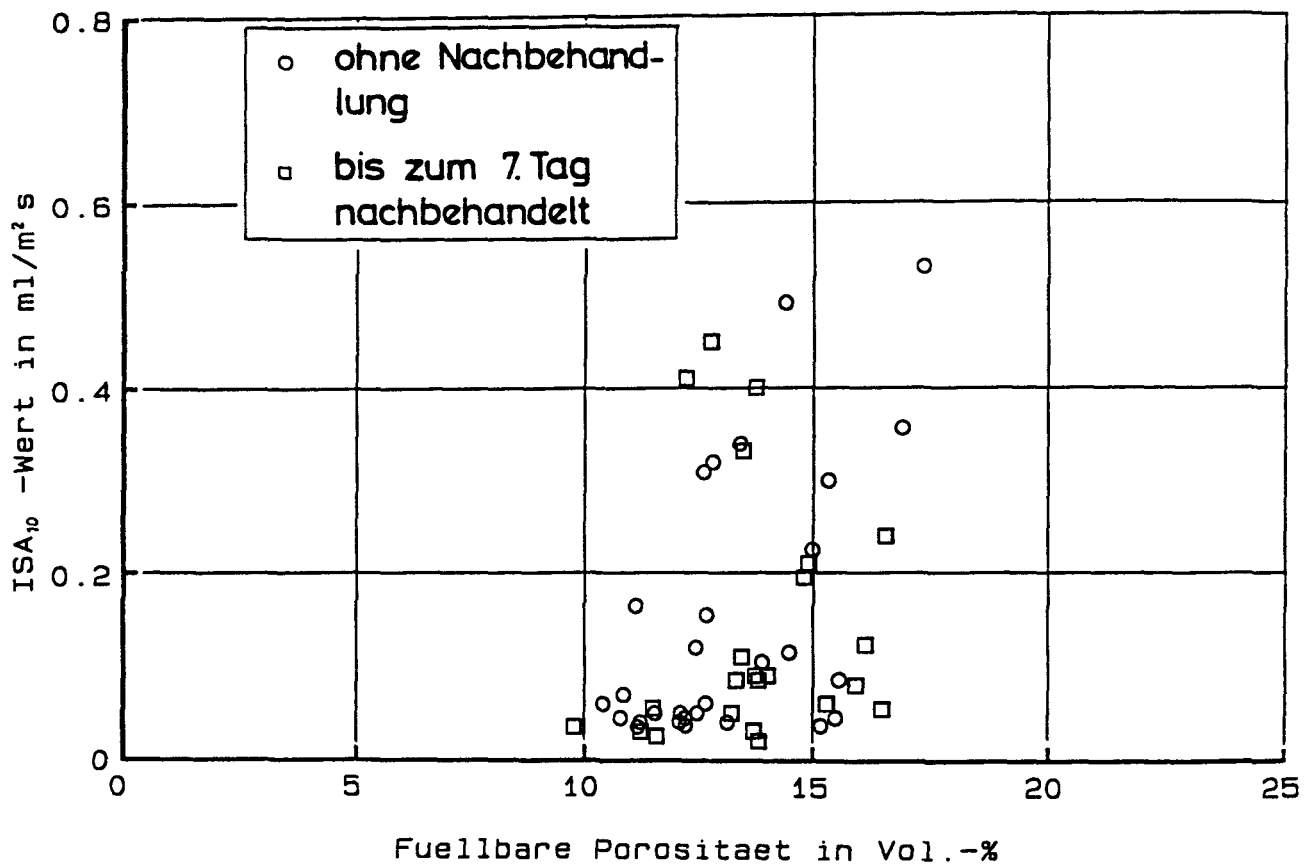


Bild 4.7 64 : Beziehung zwischen dem ISA_{10} -Wert gemessen auf feuchten Wandoberflächen und der füllbaren Porosität gemessen an Laborproben vergleichbaren Betonalters.

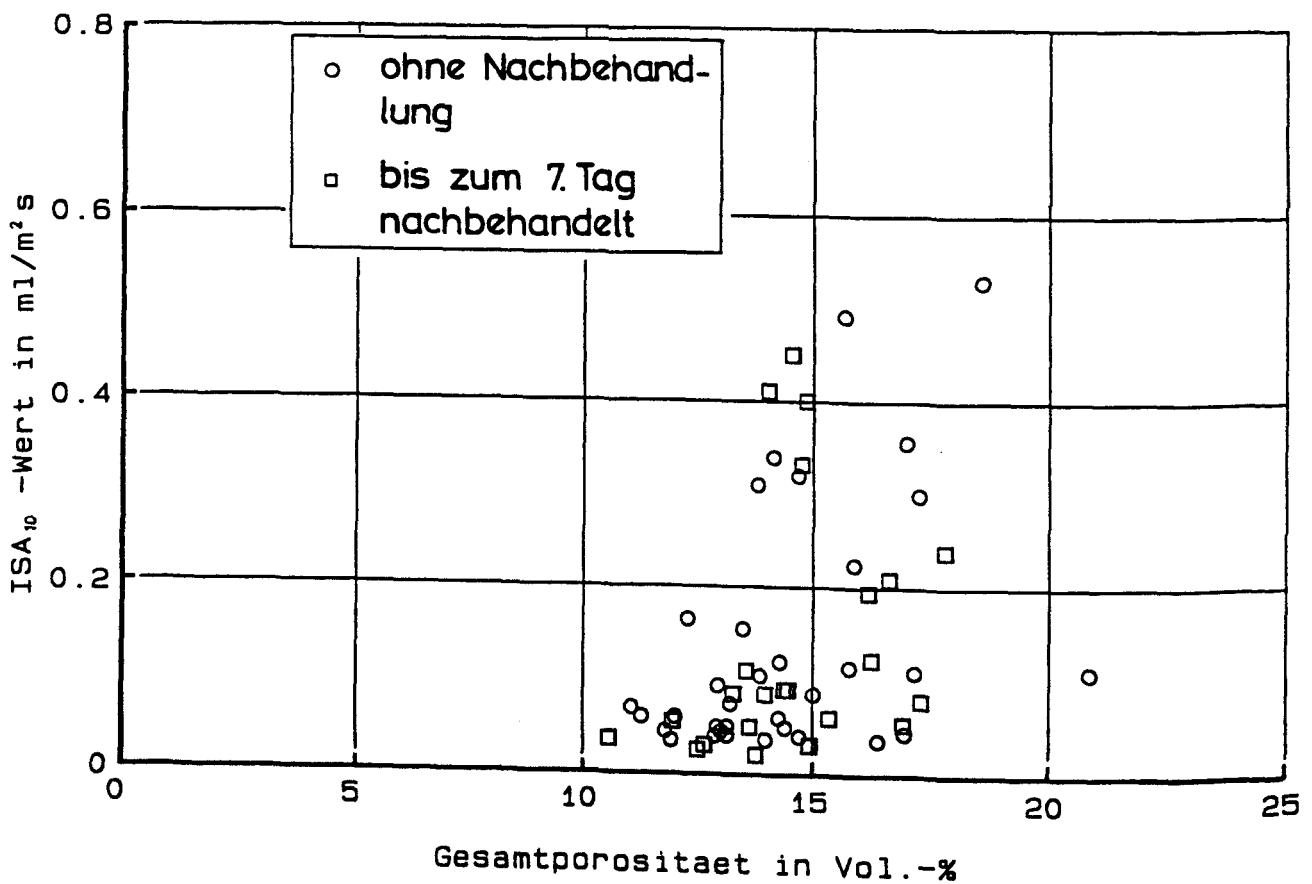


Bild 4.7 65 : Beziehung zwischen dem ISA_{10} -Wert gemessen auf feuchten Wandoberflächen und der Gesamtporosität gemessen an Laborproben vergleichbaren Betonalters.

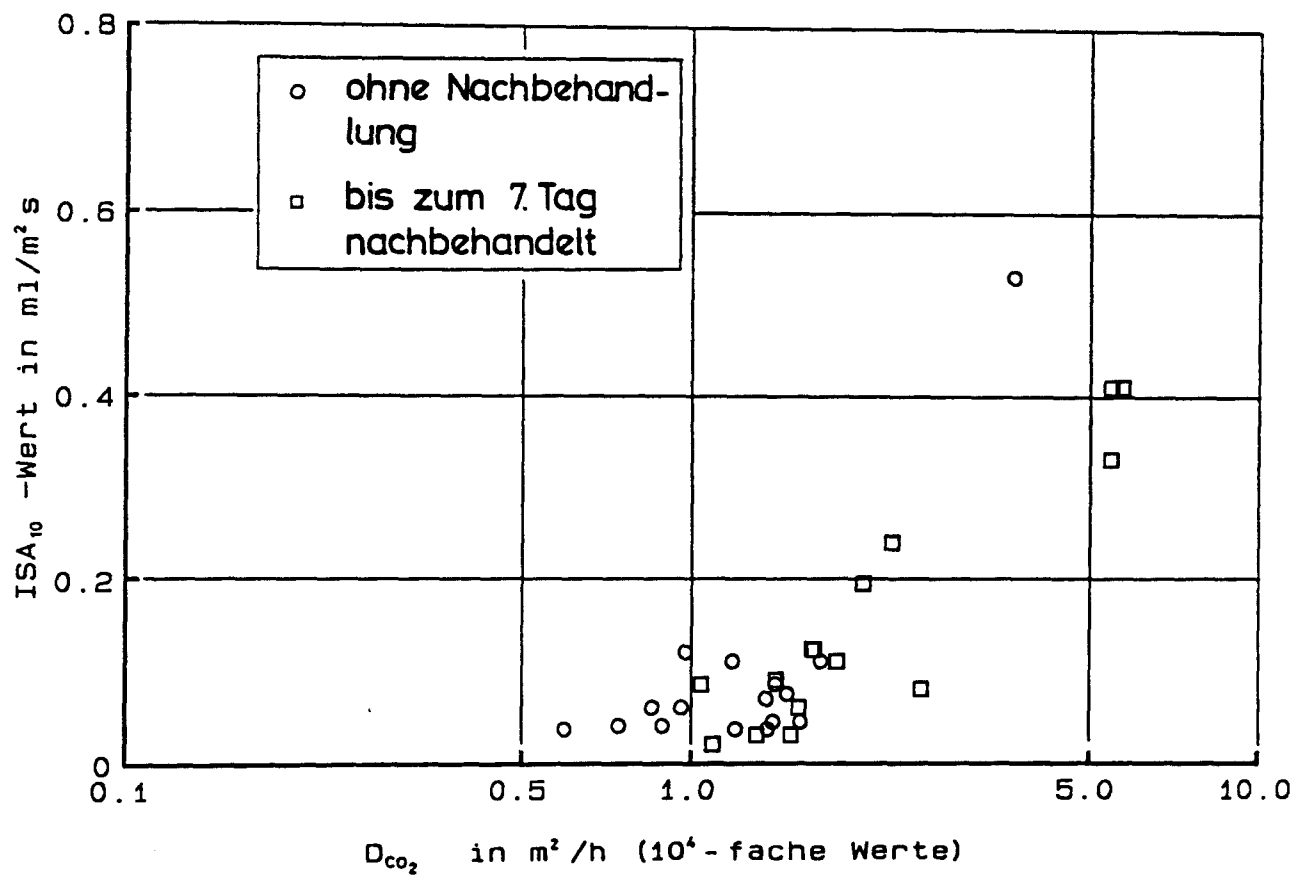


Bild 4.7 66 : Beziehung zwischen dem ISA₁₀-Wert gemessen auf feuchten Wandoberflächen und dem CO₂-Diffusionskoeffizienten gemessen an getrockneten Laborproben vergleichbaren Betonalters.

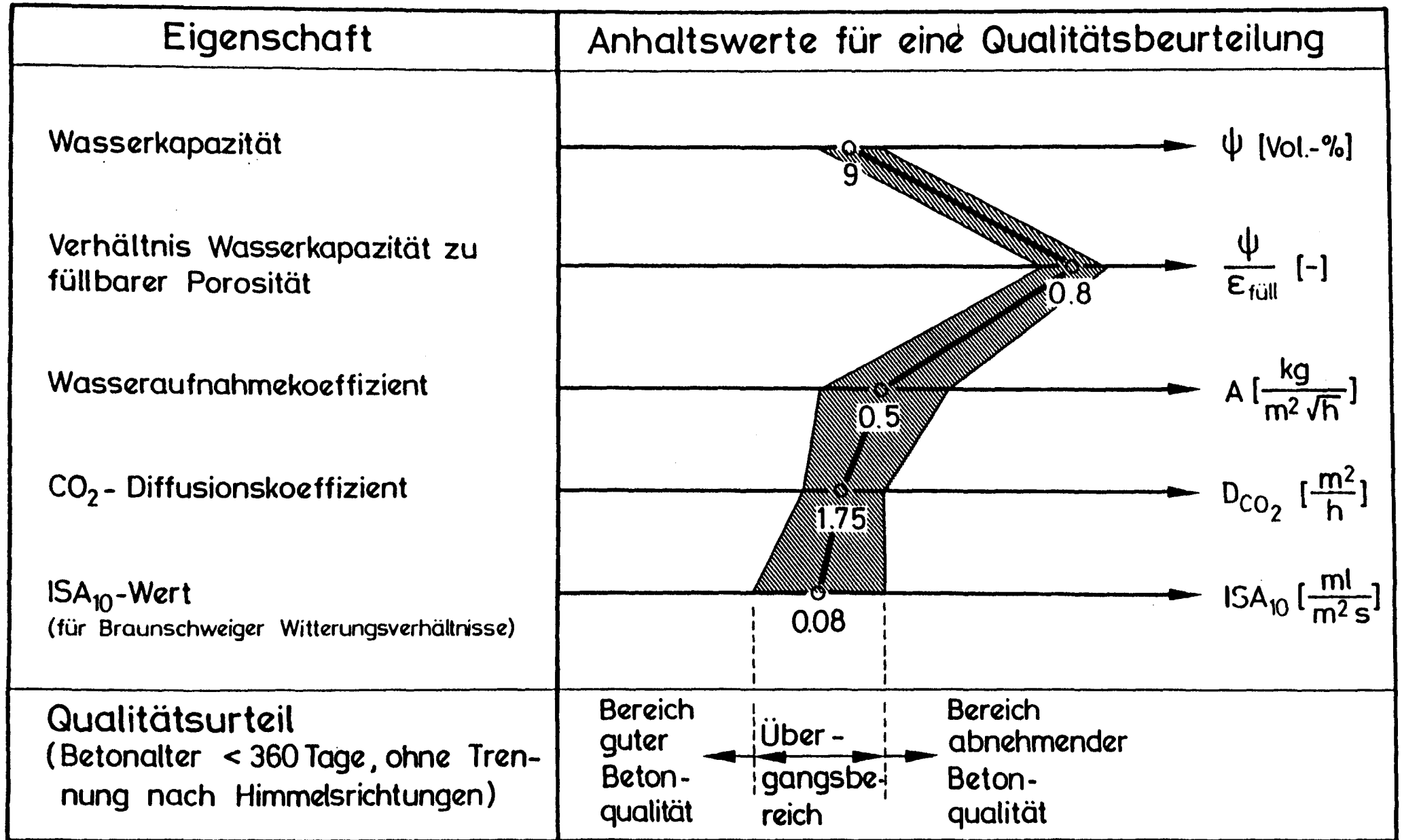


Bild 5.1 : Eigenschaftsprofil von Beton zur Beurteilung der Betonqualität.

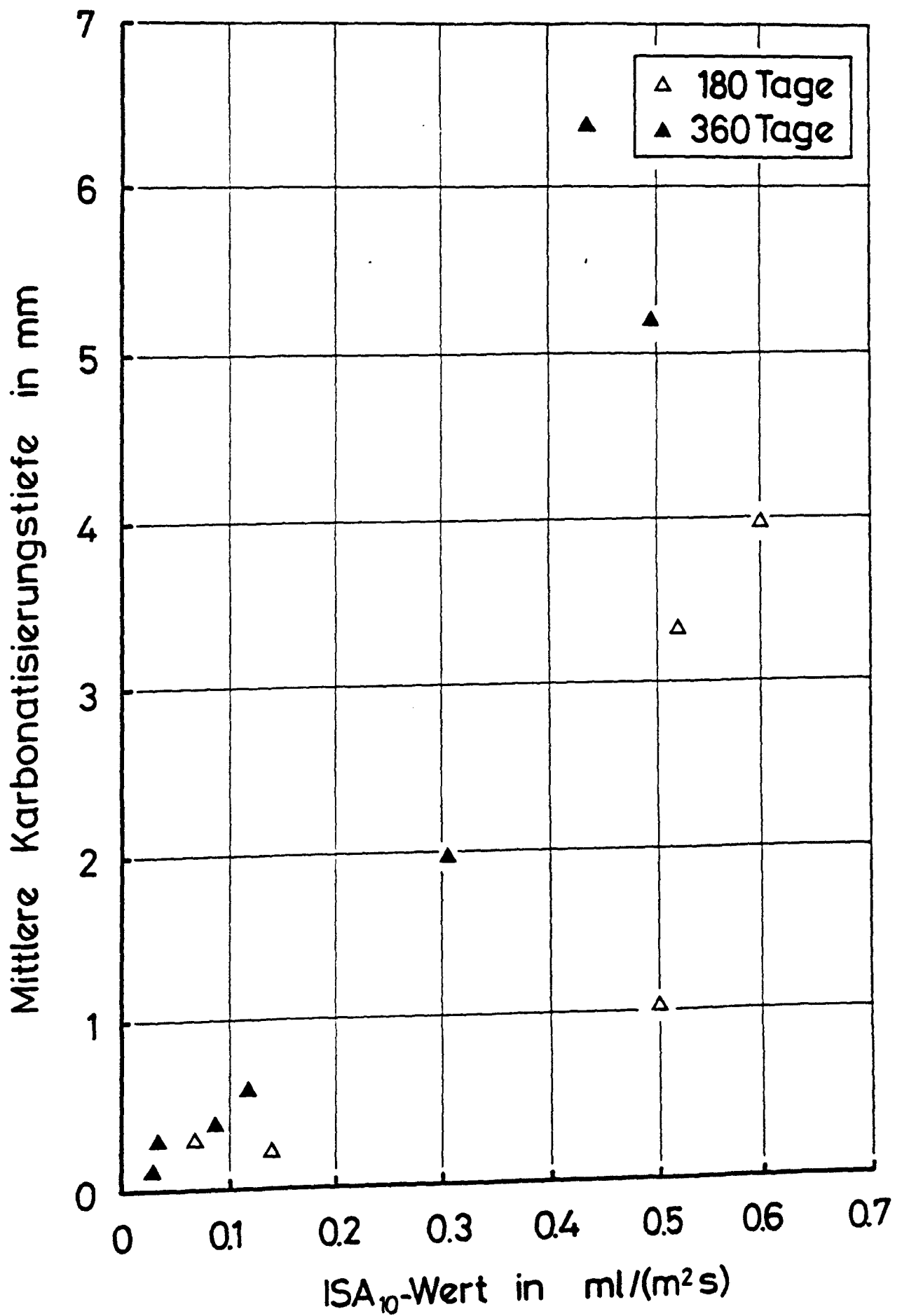


Bild 5.2 : Zusammenhang zwischen der mittleren Karbonatisierungstiefe und dem ISA₁₀-Wert für Wand I - VIII.